

**PENGARUH PENAMBAHAN KATALIS BENTONIT PADA
GASIFIKASI *UPDRAFT* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT
TERHADAP HASIL SYNGAS**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



DHIO BAGUS PRABOWO

NIM. 145060200111052

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH PENAMBAHAN KATALIS BENTONIT PADA GASIFIKASI *UPDRAFT* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT TERHADAP HASIL SYNGAS

SKRIPSI TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



DHIO BAGUS PRABOWO
NIM. 145060200111052

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 13 Juli 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng.
NIP. 19740121 199903 1 001

Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract.
NIK. 201607 811024 1 001



Mengetahui,
Ketua Program Studi S1
Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI:

**PENGARUH PENAMBAHAN KATALIS BENTONIT PADA GASIFIKASI *UPDRAFT*
TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT TERHADAP HASIL SYNGAS**

Nama Mahasiswa : Dhio Bagus Prabowo
NIM : 145060200111052
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng.
Pembimbing II : Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT
Dosen Penguji 2 : Winarto, ST., MT., Ph.D
Dosen Penguji 3 : Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng

Tanggal Ujian : 5 Juli 2018
SK Penguji : 1364/UN.F07/SK/2018



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang sepengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelurusan berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak pernah terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 13 Juli 2018

Mahasiswa,



Dhio Bagus Prabowo
NIM. 145060200111052

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 084/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

DHIO BAGUS PRABOWO

Dengan Judul Skripsi :

PENGARUH PENAMBAHAN KATALIS BENTONIT PADA GASIFIKASI *UPDRAFT*
TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT TERHADAP HASIL SYNGAS

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan
dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **12 JULI 2018**

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Ir. Djardat B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, nikmat, serta karunia-Nya yang telah diberika sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi dengan judul **“Pengaruh Penambahan Katalis Bentonit Pada Gasifikasi Updraft Tandan Kosong Kelapa Sawit Terhadap Hasil Syngas”**.

Skripsi ini disusun sebagai bentuk dokumentasi dan hasil akhir dari proses perkuliahan yang telah dilaksanakan dan juga sebagai syarat bagi mahasiswa jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya untuk mendapatkan gelar Sarjana.

Dalam melaksanakan proses penelitian dan penyusunan laporan ini, penulis menyadari bahwa tidak akan dapat menyelesaikan semuanya dengan baik tanpa bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada banyak pihak di antaranya:

1. Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing I yang telah memberi bimbingan serta ilmu dalam penyusunan skripsi ini
2. Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract. selaku dosen pembimbing II yang telah memberi saran dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini
3. Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
4. Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
5. Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST.,MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
6. Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Konsentrasi Teknik Konversi Energi.
7. Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met., selaku dosen yang membantu membuat alat *gasifier* pada penelitian ini.
8. Seluruh dosen pengajar, staf administrasi, dan karyawan jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberi ilmu dan bantuan untuk mendukung penyusunan skripsi ini.
9. Kedua orang tua tercinta, Bapak Sunarso (alm) dan Ibu Martiningsih. Terimakasih Tak terhingga atas seluruh doa, nasihat, inspirasi, serta dukungan yang telah diberikan.

10. Keluarga Besar Tim APATTE 62 BRAWIJAYA terimakasih atas pengalaman, dukungan, kerjasama dan doanya.
11. Sahabat dari awal kuliah, Viki, Aong, Harish, Lingga, Fathur, Ahlal, Ari, Bara, Aries, Ichsan, Raka, Maulana, Difta, dan Farhan yang selalu mendoakan dan memberi semangat.
12. Teman-teman seperjuangan Mesin 2014 terimakasih atas solidaritas, kebersamaan, dan semua memori yang tak akan pernah terlupakan.
13. A'yan Sabitah, ST. yang telah membantu menyelesaikan skripsi dan memberi spesimen untuk skripsi.
14. Mbak Uz yang telah membantu dalam menyelesaikan format skripsi.
15. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi.

Penulis menyadari laporan ini masih jauh dari sempurna dan masih terdapat banyak kekurangan. Oleh sebab itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang dapat membantu perkembangan pembahasan terkait topik laporan ini maupun bagi penulis secara pribadi. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak dan bagi perkembangan keilmuan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.

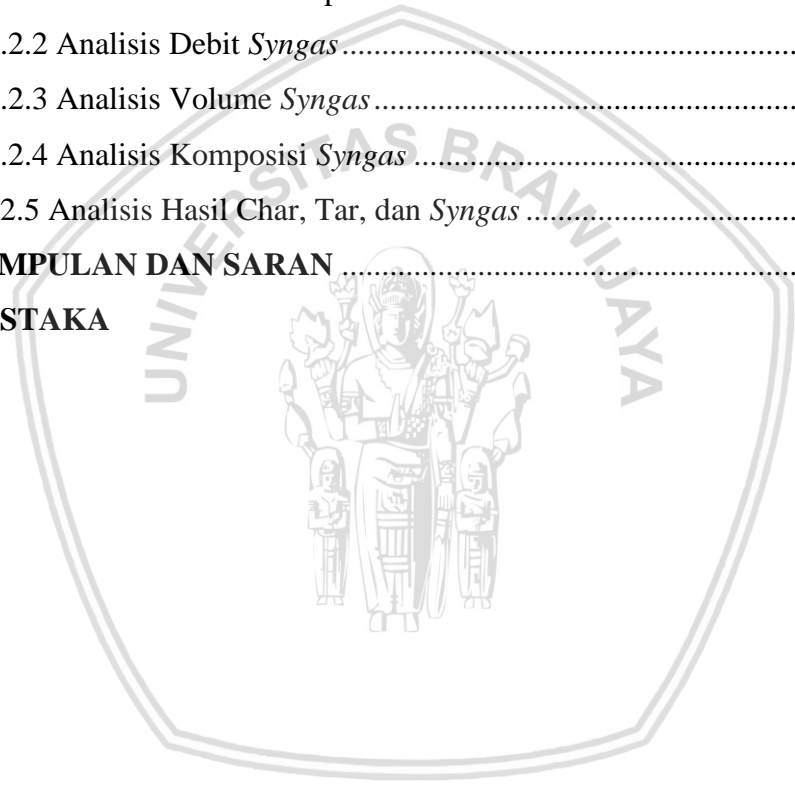
Malang, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Katalis	8
2.3 Bentonit	10
2.4 Gasifikasi	11
2.4.1 Reaksi dan Tahapan Proses Gasifikasi	12
2.4.2 Proses Dekomposisi Biomassa	13
2.4.3 Jenis-Jenis Gasifikasi	15
2.5 Biomassa	17
2.6 Tandan Kosong Kelapa Sawit	18
2.7 Syngas	19
2.8 Hipotesis	19
BAB III METODE PENELITIAN	21
3.1 Metode Penelitian	21
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	21
3.3 Variabel Penelitian	21
3.3.1 Variabel Bebas	21
3.3.2 Variabel Terikat	21

3.3.3 Variabel Terkontrol	21
3.4 Alat dan Bahan Penelitian	22
3.4.1 Alat Penelitian	22
3.4.2 Bahan Penelitian	24
3.5 Prosedur Penelitian	24
3.6 Diagram Alir Penelitian	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Data Hasil Penelitian	27
4.2 Pembahasan dan Analisa Grafik	27
4.2.1 Analisis Histori Temperatur Biomassa	27
4.2.2 Analisis Debit <i>Syngas</i>	30
4.2.3 Analisis Volume <i>Syngas</i>	32
4.2.4 Analisis Komposisi <i>Syngas</i>	32
4.2.5 Analisis Hasil Char, Tar, dan <i>Syngas</i>	36
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	37
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Jumlah Hidrokarbon Hasil Pirolisis	5
Tabel 2.2	Nilai Kalor Hasil Pirolisis	6
Tabel 2.3	Hasil Analisis thermogravimetri Limbah Kelapa Sawit dan simulasi gasifikasi ..	7
Tabel 2.4	Komposisi Kimia Montmorillonit	11
Tabel 2.5	Analisis <i>Proximate</i> dan <i>Ultimate</i> Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	19



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Pengaruh kenaikan suhu dan penambahan katalis terhadap volume gas hasil gasifikasi.....	7
Gambar 2.2	Pengaruh penambahan katalis terhadap komposisi gas hasil gasifikasi di temperatur 450° C	8
Gambar 2.3	Penurunan energi aktivasi	9
Gambar 2.4	Struktur montmorillonit.....	10
Gambar 2.5	Mekanisme <i>thermal cracking</i>	13
Gambar 2.6	Mekanisme <i>catalytic cracking</i>	14
Gambar 2.7	Gasifier <i>downdraft</i>	15
Gambar 2.8	Gasifier <i>updraft</i>	16
Gambar 2.9	Gasifier <i>crossdraft</i>	17
Gambar 2.10	Macam-macam metode konversi biomassa.....	18
Gambar 3.1	Instalasi gasifier.....	24
Gambar 4.1	Hubungan temperatur biomassa terhadap waktu pada variasi penambahan bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%	28
Gambar 4.2	Laju pemanasan gasifikasi <i>updraft</i> tandan kosong kelapa sawit pada variasi penambahan bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%	29
Gambar 4.3	Grafik hubungan temperatur biomassa terhadap debit <i>syngas</i> pada variasi (a) 0% Bentonit, (b) 10% Bentonit, (c) 30% Bentonit, dan (d) 50% Bentonit	30
Gambar 4.4	Grafik hubungan persentase bentonit terhadap volume <i>syngas</i>	32
Gambar 4.5	Grafik hubungan persentase bentonit terhadap komposisi kandungan <i>syngas</i>	33
Gambar 4.6	Grafik perbandingan nilai kalor pada variasi penambahan bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%	35
Gambar 4.7	Grafik hubungan persentase bentonit terhadap komposisi produk hasil gasifikasi.....	36

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1.	Data histori temperatur biomassa
Lampiran 2.	Grafik GC (Gas Chromatography)
Lampiran 3.	<i>Heating value syngas</i>
Lampiran 4.	Pengambilan data
Lampiran 5.	Data volume <i>syngas</i>
Lampiran 6.	Hasil perhitungan debit



RINGKASAN

Dhio Bagus Prabowo, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Mei 2018, Pengaruh Penambahan Katalis Bentonit Pada Gasifikasi *Updraft* Tandan Kosong Kelapa Sawit Terhadap Hasil *Syngas*, Dosen Pembimbing: Nurkholis Hamidi dan Redi Bintarto.

Kebutuhan energi dari minyak bumi di berbagai negara di dunia mengalami peningkatan tajam dalam beberapa tahun terakhir. Salah satu faktor penyebabnya adalah peningkatan kebutuhan sarana transportasi dan aktivitas industri. Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang tersedia dari limbah pertanian, peternakan, dan perkebunan. Biomassa dapat dikonversikan menjadi energi dengan cara dibakar secara langsung atau dengan teknologi konversi. Gasifikasi merupakan salah satu teknologi untuk mengkonversikan bahan padat maupun cair menjadi bahan bakar dengan bantuan panas dan pada kondisi udara terbatas. Hasil dari proses gasifikasi berupa tar, char, dan gas mampu bakar yang kandungan utamanya adalah metana, hidrogen, karbon monoksida, dan karbon dioksida. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan katalis bentonit terhadap hasil *syngas* pada proses gasifikasi *updraft* tandan kosong kelapa sawit. Bentonit merupakan salah satu lempung yang banyak ditemukan di wilayah Indonesia dan mempunyai kandungan utama Al_2O_3 dan SiO_2 . Biomassa yang digunakan adalah tandan kosong kelapa sawit karena merupakan salah satu limbah terbesar dari industri kelapa sawit dan memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi. Proses gasifikasi dilakukan menggunakan gasifier tipe *updraft* selama 2 jam dan menggunakan bahan baku tandan kosong kelapa sawit sebanyak 200 gram. Dalam penelitian ini digunakan variasi penambahan bentonit sebesar 0%, 10%, 30%, dan 50% dari berat biomassa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan katalis bentonit pada proses gasifikasi tandan kosong kelapa sawit dapat meningkatkan volume dan debit *syngas* yang dihasilkan. Selain itu analisis komposisi *syngas* dengan menggunakan gas chromatography menunjukkan bahwa penambahan katalis bentonit mampu menaikkan kandungan gas metana. Kenaikan volume *syngas* dan kandungan gas metana disebabkan oleh proses *catalytic cracking*, yaitu proses terputusnya rantai panjang hidrokarbon menjadi rantai yang lebih sederhana dengan bantuan katalis.

Kata Kunci: Gasifikasi, Biomassa, Tandan Kosong Kelapa Sawit, Bentonit, *Syngas*, *Catalytic Cracking*.

SUMMARY

Dhio Bagus Prabowo, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, May 2018, The Effect of Bentonite Addition on Syngas Production From Empty Fruit Bunch Oil Palm Gasification by Updraft Method, Academic Supervisor: Nurkholis Hamidi and Redi Bintarto

The energy needs of petroleum in various countries around the world have increased sharply in recent years. One of the contributing factors is the increasing need of transportation and industrial activities. Biomass is one of the renewable energy sources available from agricultural waste, livestock, and plantations. Biomass can be converted into energy by being burned directly or by conversion technology. Gasification is one of technology used to convert solid and liquid materials into fuel with the help of heat and in limited air conditions. The results of the gasification process are tar, char, and combustible gas which is the main contents are methane, hydrogen, carbon monoxide, and carbon dioxide. The purpose of this study is to determine the effect of adding bentonite catalyst to the syngas results in the updraft gasification process of empty palm oil bunches. Bentonite is one of the most common clays found in Indonesia and has the main content of Al_2O_3 and SiO_2 . The biomass used is empty palm oil bunches because it is one of the largest waste from the palm oil industry and has the potential to be utilized as an energy source. The gasification process was done using updraft type gasifier for 2 hours and using raw material of oil palm empty bunches as much as 200 gram. In this study, the variations of bentonite addition used are 0%, 10%, 30%, and 50% of the weight of biomass. The results showed that the addition of bentonite catalyst to gasification process of empty palm oil bunches can increase the volume and flow rate of syngas produced. In addition, the analysis of syngas composition by using gas chromatography shows that the addition of bentonite catalyst can increase methane gas content. The increasing syngas production and methane content is caused by catalytic cracking. The catalytic cracking is breaking process of complex hydrocarbon into shorter hydrocarbon by catalyst.

Keywords: Gasification, Biomass, Empty Fruit Bunch Oil Palm, Bentonite, Syngas, Catalytic Cracking.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi dari minyak bumi di berbagai negara di dunia mengalami peningkatan tajam dalam beberapa tahun terakhir. Tidak hanya pada negara-negara maju, tetapi juga di negara berkembang seperti Indonesia. Data konsumsi energi di Indonesia yang diperoleh dari dewan energi nasional menunjukkan bahwa pada tahun 2000-2012 konsumsi energi di Indonesia mengalami peningkatan yang cukup signifikan, dengan nilai rata-rata 2,9% pertahun dan penggunaan energi yang paling banyak adalah minyak bumi yaitu sebesar 48%. Salah satu faktor penyebabnya adalah peningkatan kebutuhan sarana transportasi dan aktivitas industri. Melihat kondisi tersebut, pemerintah telah mengeluarkan Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional untuk mengembangkan sumber energi alternatif sebagai pengganti BBM.

Belakangan ini salah satu energi alternatif yang banyak dimanfaatkan adalah energi dari limbah-limbah pertanian dan perkebunan berupa biomassa. Biomassa merupakan istilah untuk semua bahan organik yang berasal dari tanaman. Biomassa adalah *renewable energy source* yang banyak ditemukan di Indonesia. Indonesia sendiri memiliki potensi sebesar 32.654 MW energi dari biomassa, akan tetapi pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar masih kurang maksimal. Dari potensi tersebut hanya sekitar 1.716 MW atau 5,3% saja yang dimanfaatkan (Dewan Energi Nasional, 2014). Biomassa limbah pertanian dan perkebunan masih dimanfaatkan dengan cara membakarnya secara langsung sehingga nilai kalor yang dihasilkan kecil dan menimbulkan banyak polusi.

Indonesia sebagai negara agraris yang beriklim tropis memiliki banyak lahan sawah dan juga perkebunan. Salah satu komoditas perkebunan yang sedang berkembang di Indonesia adalah kelapa sawit. Data yang dikutip dari kementerian pertanian menunjukkan bahwa laju pertumbuhan areal lahan kebun kelapa sawit pada tahun 2015-2017 mengalami kenaikan hingga 5,81%. Berbanding lurus dengan perluasan areal perkebunan kelapa sawit, tingkat produksi kelapa sawit pada tahun 2015-2017 mengalami kenaikan dari 31 juta ton menjadi 35,3 juta ton. Di sisi lain, peningkatan produksi hasil perkebunan kelapa sawit juga ikut meningkatkan produksi limbah. Pengolahan kelapa sawit membutuhkan proses yang panjang mulai dari pengangkutan ke lokasi pabrik hingga pemurnian sehingga didapat *Crude palm oil* berkualitas. Pada proses pengolahan kelapa sawit, setiap 1 ton kelapa sawit

menghasilkan limbah berupa tandan kosong 23%, cangkang 6,5% , serabut 13%, limbah cair 50%, dan *wet decanter solid* (lumpur sawit) 4% (Ditjen PPHP, 2006).

Limbah padat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat yang jumlahnya cukup besar yaitu sekitar 6 juta ton pada tahun 2006, namun pemanfaatannya masih terbatas. TKKS memiliki nilai kalori sebesar 1200 Kkal/Kg (Ditjen PPHP, 2006). Jika dikalkulasikan secara kasar dengan ketersediaan TKKS sebesar 6 juta ton setiap tahun, maka limbah TKKS dapat menghasilkan sekitar 30 juta giga joule energi. Nilai tersebut sama dengan 1 juta ton batu bara/tahun (nilai kalor 29,5 GJ/ton) atau sama dengan 651.000 ton bensin/tahun. Namun potensi sebesar itu masih belum bisa dimanfaatkan secara maksimal, Selama ini TKKS hasil limbah produksi kelapa sawit hanya dibakar atau ditebarkan di lahan perkebunan sebagai mulsa.

Gasifikasi adalah proses kimia untuk merubah material berkarbon seperti biomassa menjadi gas yang mampu bakar (CO , CH_4 , H_2) dengan menggunakan udara terbatas yaitu antara 20% hingga 40% udara stoikiometri. Pada proses gasifikasi akan terbentuk zona-zona yang terbagi menurut besarnya temperatur, masing-masing zona tersebut adalah pengeringan pada suhu 25°C hingga 150°C, pirolisa pada suhu 150°C hingga 600°C, reduksi pada suhu 600°C hingga 900°C, dan pembakaran pada suhu 900°C hingga 1400°C. Proses gasifikasi terjadi pada reaktor bernama *gasifier* dan gas hasil dari proses gasifikasi disebut *biogas*, *producer gas* atau *syngas*.

Katalis adalah zat yang digunakan untuk mempercepat reaksi kimia. Dengan menggunakan katalis, suatu reaksi kimia bisa menjadi lebih cepat atau dapat mengurangi energi aktivasi yang dibutuhkan oleh suatu zat untuk bisa bereaksi. Pada proses gasifikasi juga dapat di tambahkan suatu katalis seperti yang telah di tulis oleh Dou (2016) bahwa penambahan katalis berupa bentonit pada proses gasifikasi mampu meningkatkan komposisi dan volume gas.

Menurut Arena (2012), teknologi gasifikasi bisa menjadi pilihan untuk menangani permasalahan penumpukan limbah padat secara efisien dan juga sebagai energi alternatif yang bersih. Dengan besarnya jumlah limbah TKKS dan pemanfaatan limbah yang kurang efisien, maka Teknologi gasifikasi dapat menjadi pilihan untuk menangani penumpukan limbah kelapa sawit yang ada di Indonesia dan juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif pilihan. Pada penelitian kali ini akan memanfaatkan limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai sumber bahan bakar alternatif melalui metode gasifikasi *updraft* dengan menggunakan katalis bentonit.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, dirumuskan sebuah permasalahan yaitu:

1. Bagaimana pengaruh penambahan bentonit terhadap komposisi gas hasil gasifikasi *updraft* tandan kosong kelapa sawit?
2. Bagaimana pengaruh penambahan bentonit terhadap produktifitas gas hasil gasifikasi *updraft* tandan kosong kelapa sawit?

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat batasan-batasan antara lain yaitu:

1. Tandan kelapa sawit yang digunakan berasal dari Kalimantan
2. Gasifier yang digunakan adalah gasifier *updraft*

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk

1. Mengetahui pengaruh bentonit sebagai katalis terhadap komposisi gas hasil gasifikasi *updraft* tandan kosong kelapa sawit.
2. Mengetahui pengaruh bentonit sebagai katalis terhadap produktifitas gas hasil gasifikasi *updraft* tandan kosong kelapa sawit.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Dapat menerapkan ilmu dalam perkuliahan.
2. Menghasilkan data penelitan yang nantinya dapat dibandingkan dengan proses proses gasifikasi yang lain.
3. Sebagai alternatif penyelesaian masalah limbah tandan kosong kelapa sawit yang sering menumpuk.
4. Dapat menghasilkan sumber energi alternatif yang terbarukan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Pada penelitian sebelumnya sudah ada penelitian mengenai pemanfaatan biomassa dan metode-metode untuk meningkatkan efisiensi konversi energi biomassa. Kosivtsov et al, pada tahun 2015 meneliti tentang pengaruh variasi katalis terhadap nilai kalor produksi gas hasil pirolisis gambut. Pada penelitian ini suhu pirolisis dikontrol pada suhu sekitar 400°C - 600°C selama 100 menit. Variasi katalis yang digunakan yaitu aluminosilikat alami (kaolin, bentonit, dan mergel) dan zeolit sintetis (H-Beta-25 dan H-Mord-20). Dari hasil penelitian ini diperoleh data jumlah mol hidrokarbon total yang didapat pada proses pirolisis pada variasi masing-masing katalis. Hasilnya bisa dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1
Jumlah Hidrokarbon Hasil Pirolisis

Hydro-carbons	Time, s	The accumulation of hydrocarbons, mol					
		Without catalyst	Bentonite clay	Caolin clay	Clay mergel	H-Beta-25	H-MORD
Methane	0	0	0	0	0	0	0
	360	$0.04 \cdot 10^{-5}$	$0.05 \cdot 10^{-5}$	$0.07 \cdot 10^{-5}$	$0.07 \cdot 10^{-5}$	$0.62 \cdot 10^{-5}$	$0.81 \cdot 10^{-5}$
	840	$1.45 \cdot 10^{-5}$	$3.26 \cdot 10^{-5}$	$3.87 \cdot 10^{-5}$	$3.16 \cdot 10^{-5}$	$12.71 \cdot 10^{-5}$	$21.98 \cdot 10^{-5}$
	1320	$4.64 \cdot 10^{-5}$	$9.09 \cdot 10^{-5}$	$8.98 \cdot 10^{-5}$	$8.90 \cdot 10^{-5}$	$26.50 \cdot 10^{-5}$	$34.17 \cdot 10^{-5}$
	1800	$7.57 \cdot 10^{-5}$	$14.50 \cdot 10^{-5}$	$13.40 \cdot 10^{-5}$	$14.50 \cdot 10^{-5}$	$38.36 \cdot 10^{-5}$	$42.98 \cdot 10^{-5}$
	3360	$16.40 \cdot 10^{-5}$	$29.60 \cdot 10^{-5}$	$29.60 \cdot 10^{-5}$	$30.00 \cdot 10^{-5}$	$49.53 \cdot 10^{-5}$	$55.64 \cdot 10^{-5}$
Ethane	0	0	0	0	0	0	0
	360	$0.019 \cdot 10^{-5}$	$0.02 \cdot 10^{-5}$	$0.02 \cdot 10^{-5}$	$0.01 \cdot 10^{-5}$	$0.11 \cdot 10^{-5}$	$0.13 \cdot 10^{-5}$
	840	$0.54 \cdot 10^{-5}$	$0.97 \cdot 10^{-5}$	$0.72 \cdot 10^{-5}$	$0.68 \cdot 10^{-5}$	$3.41 \cdot 10^{-5}$	$8.21 \cdot 10^{-5}$
	1320	$1.41 \cdot 10^{-5}$	$2.55 \cdot 10^{-5}$	$1.73 \cdot 10^{-5}$	$1.96 \cdot 10^{-5}$	$8.05 \cdot 10^{-5}$	$9.25 \cdot 10^{-5}$
	1800	$2.08 \cdot 10^{-5}$	$4.28 \cdot 10^{-5}$	$2.72 \cdot 10^{-5}$	$3.32 \cdot 10^{-5}$	$8.25 \cdot 10^{-5}$	$9.32 \cdot 10^{-5}$
	3360	$4.45 \cdot 10^{-5}$	$10.50 \cdot 10^{-5}$	$7.09 \cdot 10^{-5}$	$8.61 \cdot 10^{-5}$	$8.35 \cdot 10^{-5}$	$9.41 \cdot 10^{-5}$
Propane	0	0	0	0	0	0	0
	360	0	$0.07 \cdot 10^{-5}$	0	0	$1.31 \cdot 10^{-5}$	$0.15 \cdot 10^{-5}$
	840	$0.25 \cdot 10^{-5}$	$1.29 \cdot 10^{-5}$	$0.37 \cdot 10^{-5}$	$0.03 \cdot 10^{-5}$	$4.35 \cdot 10^{-5}$	$3.42 \cdot 10^{-5}$
	1320	$0.66 \cdot 10^{-5}$	$2.56 \cdot 10^{-5}$	$0.87 \cdot 10^{-5}$	$0.95 \cdot 10^{-5}$	$5.26 \cdot 10^{-5}$	$3.65 \cdot 10^{-5}$
	1800	$0.99 \cdot 10^{-5}$	$3.55 \cdot 10^{-5}$	$1.34 \cdot 10^{-5}$	$1.58 \cdot 10^{-5}$	$5.36 \cdot 10^{-5}$	$3.84 \cdot 10^{-5}$
	3360	$2.02 \cdot 10^{-5}$	$6.51 \cdot 10^{-5}$	$3.23 \cdot 10^{-5}$	$3.86 \cdot 10^{-5}$	$5.42 \cdot 10^{-5}$	$4.29 \cdot 10^{-5}$

Sumber: Kosivtsov et al (2015)

Tabel 2.1 memperlihatkan bahwa penggunaan katalis bentonit menghasilkan jumlah etana dan propana terbesar dibandingkan katalis yang lain. Hal tersebut karena bentonit memiliki luas permukaan dan persebaran pori-pori paling luas dibandingkan katalis yang

lain. Penelitian Kosivtsov et al, 2015, juga meneliti tentang jumlah kalor yang dihasilkan pada pirolisis tiap variasi katalis. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2
Nilai Kalor Hasil Pirolisis

Time, s	Q, mJ/m ³					
	Without catalyst	Bentonite clay	Caolin clay	Clay mergel	H-Beta-25	H-MORD
0	0	0	0	0	0	0
480	2.86	2.19	2.94	2.36	7.38	10.48
960	3.53	5.50	4.73	4.15	9.71	11.21
1440	4.37	7.84	5.50	5.65	13.13	13.95
1920	5.72	10.57	7.02	7.00	14.35	14.03
3600	7.82	15.21	10.66	10.70	16.25	14.30

Sumber: Kosivtsov et al (2015)

Dari Tabel 2.2 dapat dilihat bahwa nilai kalor terbesar/volume gas pada proses pirolisis selama 60 menit yaitu pada katalis zeolit sintetis H-Beta-25, kemudian berturut-turut bentonit, H-MORD, mergel, dan kaolin. Dari hasil keseluruhan dapat disimpulkan bahwa katalis bentonit memiliki keunggulan dibandingkan dengan katalis lain yaitu menghasilkan mol hidrokarbon paling banyak dibanding katalis lain dan menghasilkan nilai kalor yang besar menyamai katalis zeolit sintetis H-Beta-25. Selain itu bentonit merupakan katalis yang dapat diperoleh dengan mudah karena merupakan katalis alami jika dibandingkan H-Beta-25 yang merupakan katalis sintetis.

Raharjo (2012), meneliti tentang analisis konversi limbah padat kelapa sawit dengan analisis thermogravimetri. Dalam penelitian tersebut cangkang kelapa sawit, serat kelapa sawit, dan tandan kosong kelapa sawit dibandingkan hasil analisis thermogravimeternya. Tahap analisis thermogravimetri yaitu dengan menaikkan suhu secara bertahap yaitu pada suhu 107° C selama 10 menit kemudian suhu dinaikkan hingga 900° C dan ditahan selama 30 menit. Proses pemanasan dilakukan pada lingkungan tanpa oksigen, dan kemudian pengurangan fraksi massa sampel selama eksperimen akan dicatat. Selanjutnya dilakukan proses simulasi gasifikasi menggunakan software kesetimbangan kimia HSC chemistry 5.1. Proses simulasi dilakukan dengan suhu gasifikasi 700°C dan menggunakan gas CO₂ sebagai reaktan dan alkali karbonat sebagai katalis.

Tabel 2.3

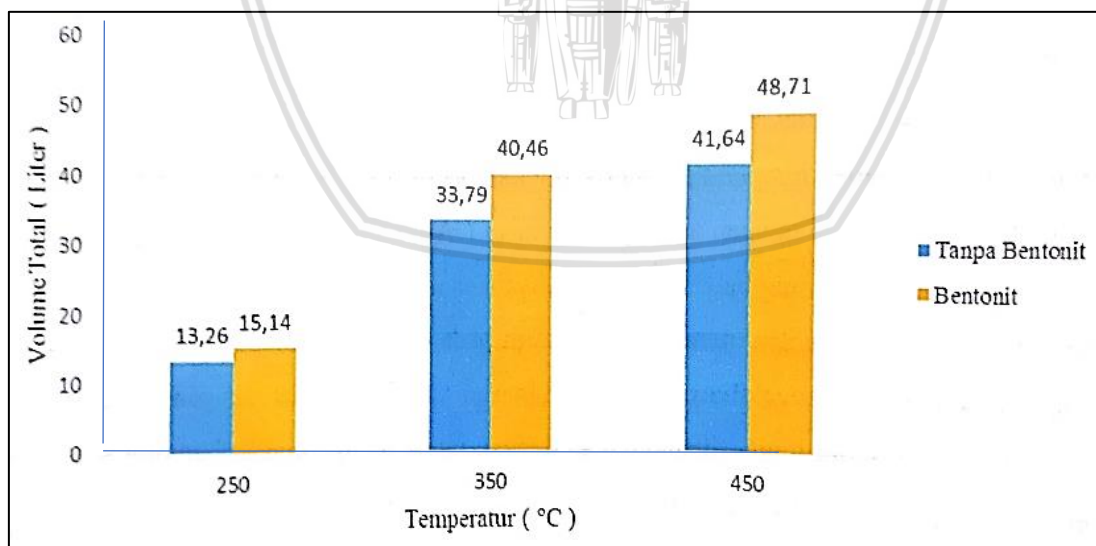
Hasil Analisis Thermogravimetri Limbah Kelapa Sawit dan simulasi gasifikasi

Sampel	Limbah Padat Kelapa Sawit			Gas	Konsentrasi Vol% pada 900°C		
	Cangkang	Serat	TKS		Cangkang	Serat	TKS
Moisture (%)	4,52	6,69	6,00	H ₂	7,6	7,4	8,2
Volatile matter (%)	82,86	84	84,92	CO	62,4	60,7	60,2
Fix Carbon (%)	11,02	2,71	1,48				
Ash (%)	1,61	8,4	7,59				
Fuel Ratio (%)	0,13	0,03	0,02				

Sumber: Raharjo (2012)

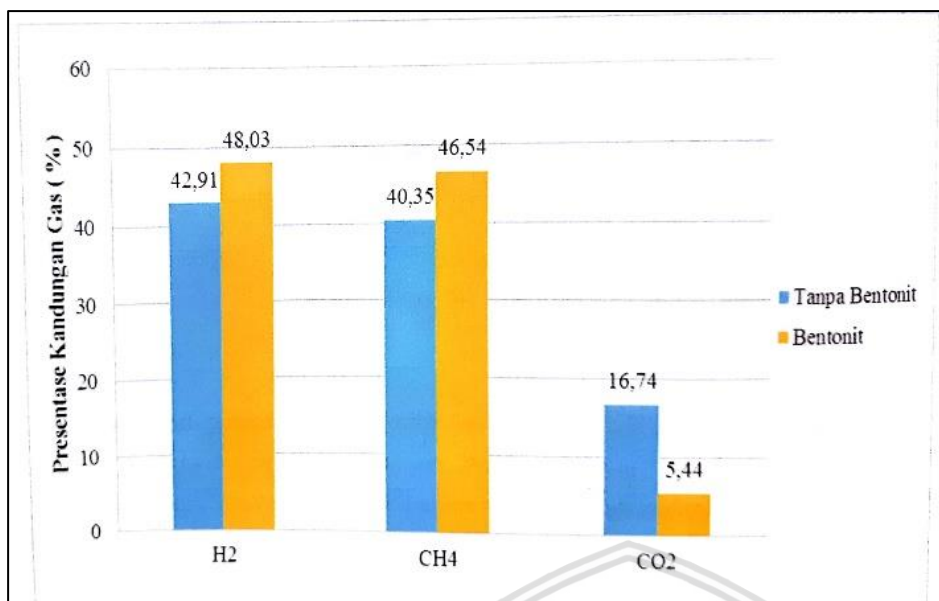
Berdasarkan data hasil analisis thermogravimetri pada Tabel 2.3 dapat dilihat bahwa kandungan *volatile matter* pada tandan kosong kelapa sawit lebih besar dibandingkan dengan cangkang dan serat kelapa sawit. Tingginya *volatile matter* yang dihasilkan akan menghasilkan gas hidrogen. Kemudian hasil simulasi gasifikasi menunjukkan bahwa gas yang dihasilkan dari gasifikasi limbah padat kelapa sawit adalah gas CO dan H₂.

Kemudian zikrilah (2017), melakukan penelitian tentang pengaruh temperatur dan penambahan katalis terhadap produk hasil gasifikasi. Peneliti menggunakan cangkang kelapa sawit sebagai spesimen sedangkan katalis yang digunakan adalah bentonit. Variasi temperatur yang dipakai adalah 250°C, 350°C, dan 450°C dan dengan rasio katalis 0% dan 50%. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil sebagai berikut.



Gambar 2.1 Pengaruh kenaikan suhu dan penambahan katalis terhadap volume gas hasil gasifikasi

Sumber: Zikrilah (2017)



Gambar 2.2 Pengaruh penambahan katalis terhadap komposisi gas hasil gasifikasi di temperatur 450°C

Sumber: Zikrilah (2017)

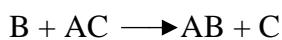
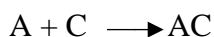
Dari Gambar 2.1 dapat dilihat bahwa penambahan katalis bentonit pada proses gasifikasi cangkang kelapa sawit menghasilkan volume gas total yang lebih besar pada setiap kenaikan temperatur. Selain juga dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur gasifikasi, volume gas yang dihasilkan juga ikut meningkat. Pada suhu 450°C dan dengan penambahan bentonit menghasilkan volume total gas yang paling banyak. Pada Gambar 2.2 zikrilah menjelaskan pengaruh penambahan katalis terhadap komposisi gas hasil gasifikasi pada temperatur 450°C. Dari grafik dapat dilihat bahwa dengan penambahan katalis bentonit, komposisi gas H₂ dan CH₄ yang terbentuk menjadi lebih banyak dan komposisi gas CO₂ mengalami penurunan.

2.2 Katalis

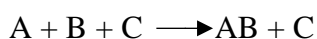
Katalis merupakan zat yang dapat mempercepat suatu reaksi kimia tanpa ikut bereaksi dengan reaksi itu sendiri. Katalis bersifat mempengaruhi reaksi, tanpa mengalami perubahan secara kimiawi di akhir reaksi (Richardson, 1989). Katalis dapat membuat reaksi menjadi lebih cepat atau membuat reaksi dapat berlangsung pada suhu yang lebih rendah. Dengan menggunakan katalis, energi minimum yang digunakan untuk berlangsungnya reaksi dapat diturunkan sehingga hanya membutuhkan energi yang lebih sedikit untuk bisa bereaksi seperti yang terlihat pada Gambar 2.3.

Katalis dapat dibagi menjadi dua yaitu katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis homogen adalah katalis yang memiliki fase yang sama dengan reaktan, sedangkan katalis

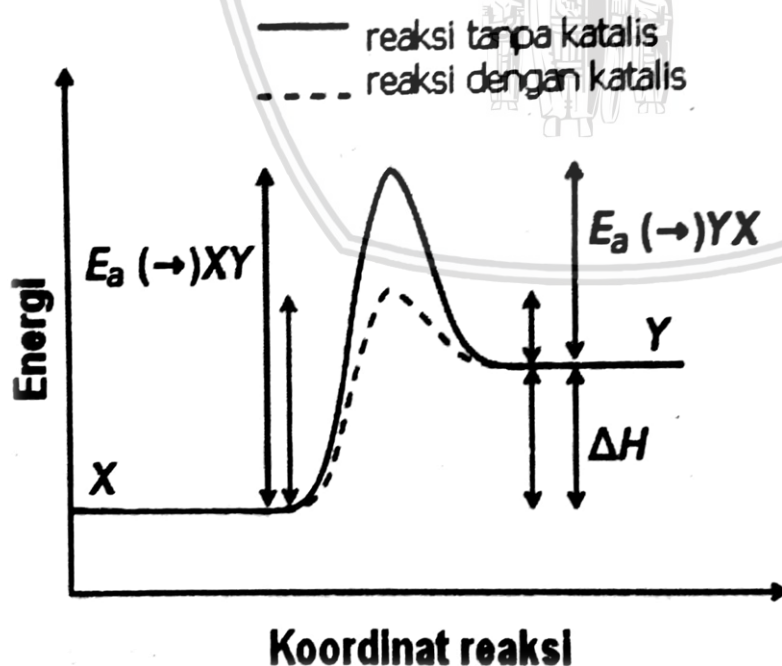
heterogen adalah katalis yang berada dalam fase yang berbeda dengan reaktannya. Berikut adalah reaksi secara umum katalis.



Dimana A dan B adalah reaktan dan C adalah katalis. Pada reaksi tersebut menunjukkan katalis C bereaksi dengan reaktan A, namun selanjutnya dihasilkan kembali menjadi katalis C seperti semula pada reaksi ke dua. Reaksi keseluruhannya dapat ditulis menjadi



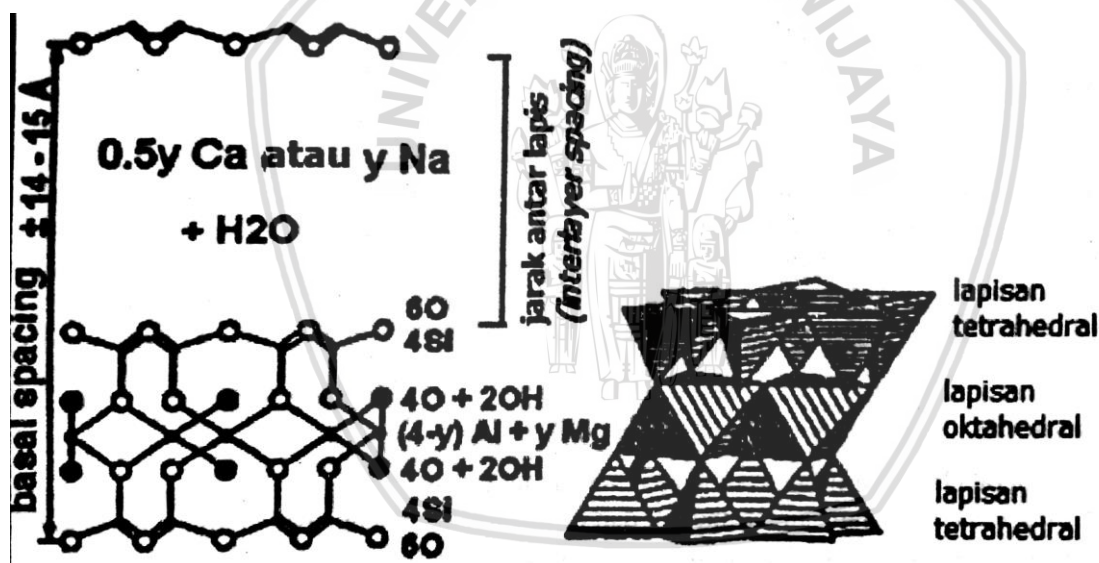
Proses gasifikasi selain menghasilkan bahan bakar gas juga menghasilkan beberapa produk yang tidak diinginkan seperti hidrokarbon (tar) yang menurunkan produk gas dan dapat mengakibatkan penyumbatan pada gasifier sehingga menaikkan biaya perawatan (Huber, 2006). Dalam proses gasifikasi penggunaan katalis memiliki beberapa keuntungan. Menurut Shahbaz et al (2017) Penggunaan katalis pada proses gasifikasi dapat meningkatkan produk *syngas* dan juga dapat mengurangi tar hasil gasifikasi. Pada dasarnya ada dua macam katalis yang digunakan pada proses gasifikasi yaitu katalis mineral dan katalis sintetis (Simell, 1992). Katalis mineral diantaranya adalah dolomit, olivine, besi oksida, dan mineral lempung. Sedangkan sintetis katalis yaitu logam alkali dan logam transisi (Ni based & Pt, Rh, Zr, Ru based).



Gambar 2.3 Penurunan energi aktivasi
Sumber: Fatimah (2014)

2.3 Bentonit

Bentonit merupakan salah satu jenis *clay* yang digunakan dalam berbagai industri seperti industri keramik, pengeboran minyak, industri logam, dan lain-lain. Dalam aplikasinya yang lebih spesifik, bentonit digunakan sebagai adsorben, penukar ion, agen dekolorisasi dan agen pemucat. Bentonit terbentuk secara alami dari perubahan geologis batu silika seperti granit dan basal yang dikeluarkan oleh gunung berapi. Bentonit mempunyai kemampuan untuk mengembang hingga 14 kali volume awalnya jika menyerap air. Mineral bentonit memiliki diameter kurang dari 2 mikrometer yang terdiri dari silika, aluminium oksida dan hidroksida yang dapat mengikat air. Penyusun utama bentonit adalah montmorillonit (85%) dengan rumus kimia $[Al_{1.67}Mg_{0.33}(Na_{0.33})] Si_4O_{10}(OH)_2$. Struktur utama montmorillonit adalah lapisan silika alumina yang merupakan lembaran tetrahedral dan lembaran oktahedral. Gambar 2.4 menunjukkan struktur tetrahedral dan oktahedral montmorillonit.



Gambar 2.4 Struktur montmorillonit
Sumber: Fatimah (2014)

Secara umum bentonit dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu *swelling bentonite* dan *non swelling bentonite* (Arifin dan Sudrajat, 1997). *swelling bentonite* adalah bentonit yang volumenya dapat mengembang hingga delapan kali volume awal apabila diberi air dan tetap terdispersi beberapa waktu dalam air. Bentonit jenis ini juga biasa disebut dengan natrium bentonit karena pada kandungannya terdapat natrium. Dalam keadaan kering bentonit jenis ini berwarna putih atau *cream* sedangkan pada saat basah dan terkena sinar matahari akan berwarna mengkilap. *non swelling bentonite* mempunyai karakteristik kurang mengembang

apabila dicelupkan dalam air dan tetap terdispersi di dalam air. Akan tetapi secara alami atau setelah diaktifkan mempunyai sifat menyerap yang baik. Dalam keadaan kering berwarna abu-abu, biru, kuning, merah, dan coklat. Komposisi kimia yang terkandung dalam bentonit dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4
Komposisi Kimia Montmorillonit

Component	Weight (%)
SiO ₂	49,4
Al ₂ O ₃	19,7
MgO	0,27
CaO	1,5
Fe ₂ O ₃	0,3
Na ₂ O	1,5
H ₂ O	25,67
Parameters	Value
Color	White
Density (g/cm ³)	2,3-3
Transparency	Semi-transparent and opaque
Brightness	Matt
Surface Area (m ² /g)	95,36
Relative index	1-2

Sumber: Yilmaz, et al (2014)

Bentonit dapat digunakan sebagai katalis pada proses pirolisis. Dengan penggunaan bentonit pada proses pirolisis dapat menghasilkan gas yang lebih banyak dan meningkatkan kandungan hydrogen dan metana meski pada temperatur rendah (Dou, 2016). Penambahan bentonit dapat mempercepat pemutusan rantai hidrokarbon karena kandungan alumina pada bentonit membuat perambatan panas menjadi lebih cepat. Bentonit juga membantu menghilangkan kandungan gas beracun pada proses gasifikasi. Penambahan bentonit dengan kandungan Na⁺ dan Ca⁺ pada proses gasifikasi dapat menurunkan kandungan ammonia. Ammonia merupakan gas racun yang dapat menurunkan pH dan dapat memperlambat proses *codigestion*.

2.4 Gasifikasi

Gasifikasi merupakan salah satu teknologi untuk mengolah biomassa untuk mengubah biomassa menjadi sumber energi terbarukan dengan cara mengkonversikan bahan padat maupun cair dengan bantuan panas untuk menjadi gas yang mampu digunakan menjadi bahan bakar. Gasifikasi adalah proses termokimia untuk mengubah material organik menjadi

gas yang mampu bakar seperti CH_4 , H_2 , CO . Pada gasifikasi terjadi proses degradasi termal material organik pada temperatur tinggi dan dalam kondisi pembakaran yang tidak sempurna.

Pada proses gasifikasi dibutuhkan medium untuk menyusun ulang struktur molekul dari char dan tar untuk dikonversikan menjadi gas mampu bakar. Medium dari proses gasifikasi diantaranya adalah udara, oksigen, dan uap air. Proses gasifikasi terjadi dalam reaktor gasifikasi yang disebut gasifier. Pada gasifier, material organik dipanaskan dengan kondisi oksigen 40%-60% dari stoikiometri sehingga terjadi pembakaran tidak sempurna. Hasil pembakaran tidak sempurna yang berupa uap air dan karbon dioksida direduksi sehingga berubah menjadi gas yang mudah terbakar seperti karbon monoksida (CO), metana (CH_4), dan hidrogen (H_2). Proses gasifikasi menghasilkan hasil sampingan berupa tar dan char.

2.4.1 Reaksi dan Tahapan Proses Gasifikasi

Proses gasifikasi terjadi pada alat yang disebut gasifier. Di dalam gasifier, biomassa dipanaskan dengan kondisi udara dibawah stoikiometri sehingga terjadi proses dekomposisi pada biomassa menjadi partikel yang lebih kecil. Proses gasifikasi mempunyai beberapa tahapan yaitu pengeringan, pirolisis, gasifikasi char, dan oksidasi/*char combustion*.

1. Pengeringan

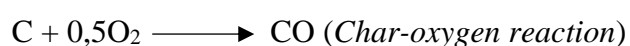
Proses pengeringan adalah proses untuk menghilangkan kandungan air yang ada pada biomassa. Rata-rata kadar air pada biomassa mencapai 60%, sehingga perlu proses pengeringan agar kadar air berkurang. Untuk memaksimalkan hasil gasifikasi diperlukan *preheating* untuk mengurangi kadar air hingga sekitar 10% - 20%. Setelah itu pengeringan terjadi di dalam gasifier.

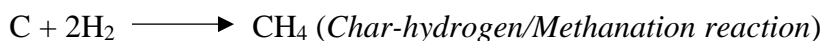
2. Pirolisis

Pirolisis adalah proses dekomposisi biomassa secara termokimia dimana molekul hidrokarbon biomassa berantai panjang akan terdekomposisi menjadi molekul gas (*non condensable gas & condensable gas*). Hasil dari proses pirolisis berupa tar (gas yang terkondensasi), char, dan gas mampu bakar.

3. Gasifikasi char

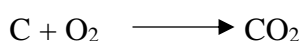
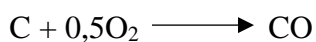
Proses gasifikasi char terjadi setelah proses pirolisis, dimana char hasil pirolisis akan bereaksi dengan medium gasifikasi seperti uap air, oksigen, karbon dioksida, dan hydrogen. Persamaan reaksi char dengan medium gasifikasi adalah sebagai berikut.





4. Oksidasi/pembakaran char

Proses oksidasi adalah reaksi eksotermis dimana suatu molekul mendapatkan oksigen. Untuk menghasilkan kalor untuk proses *drying* dan pirolisis dibutuhkan tambahan kalor dari proses pembakaran. Berikut ini adalah persamaan reaksi pembakaran char.

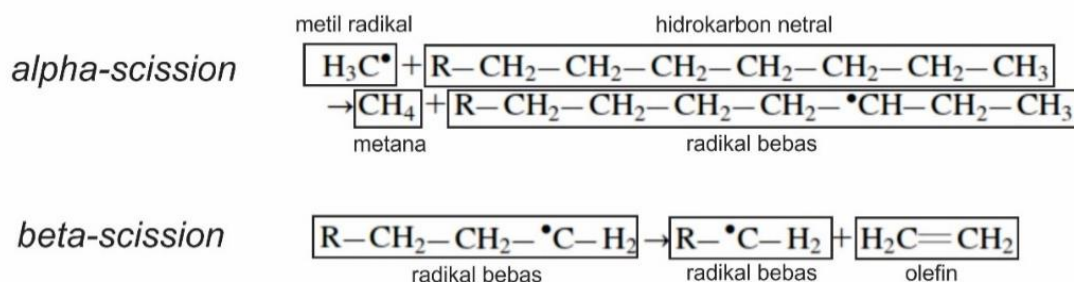
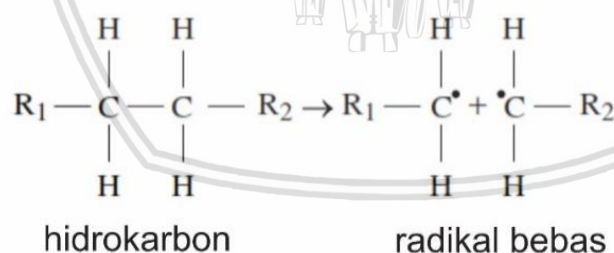


2.4.2 Proses Dekomposisi Biomassa

Pada proses gasifikasi biomassa akan mengalami proses dekomposisi. Rantai panjang hidrokarbon pada biomassa akan terputus menjadi rantai yang lebih pendek. Dalam proses gasifikasi terdapat dua reaksi utama dekomposisi biomassa yaitu *thermal cracking* dan *Catalytic cracking*.

1. Thermal cracking

Thermal Cracking adalah proses pemutusan molekul hidrokarbon yang diakibatkan oleh kalor. Dalam proses dekomposisi thermal biomassa menjadi bahan bakar, proses *thermal cracking* merupakan proses yang paling utama.

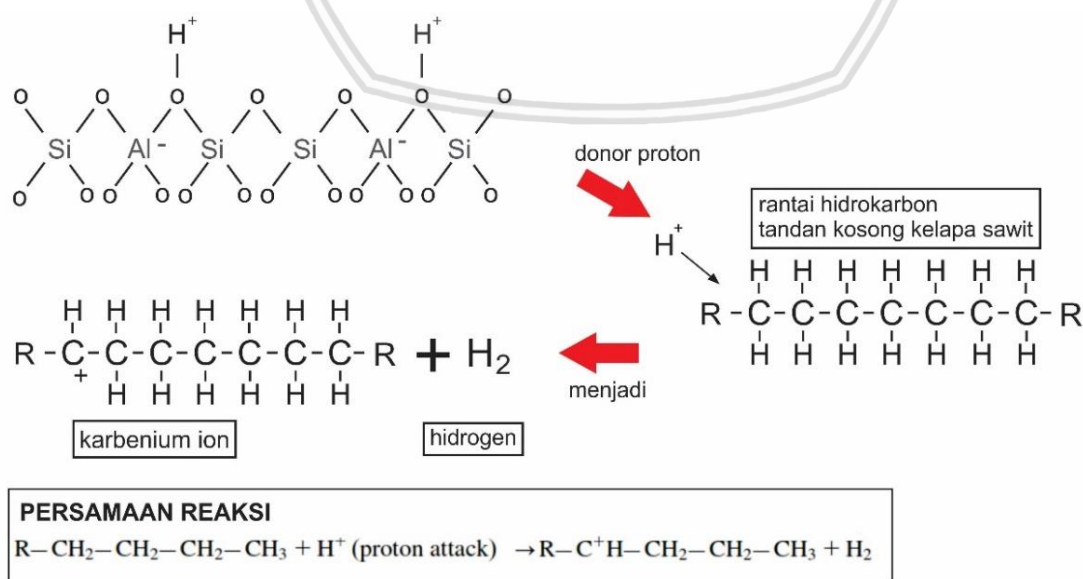


Gambar 2.5 Mekanisme *thermal cracking*

Tahapan pertama pada proses thermal cracking adalah pembentukan radikal bebas. Radikal bebas terbentuk saat molekul C-C pada hidrokarbon terputus. Radikal bebas adalah molekul yang bermuatan akibat tidak mempunyai pasangan elektron. Radikal bebas yang bersifat reaktif selanjutnya akan mengalami reaksi *alpha-scission* dan *beta-scission*. *Alpha-scission* merupakan proses pemutusan 1 atom C pada molekul radikal bebas yang menghasilkan metil radikal. Terbentuknya metil radikal mampu mengekstrak atom hydrogen dari molekul hidrokarbon netral sehingga menghasilkan metana (CH_4) dan radikal bebas sekunder. *Beta-scission* merupakan proses pemutusan 2 atom C pada molekul radikal bebas yang menghasilkan olefin dan radikal bebas primer. Mekanisme *thermal cracking* dapat dilihat pada Gambar 2.5.

2. Catalytic cracking

Catalytic cracking adalah proses pemutusan molekul hidrokarbon akibat adanya reaksi dari katalis. Pada proses gasifikasi dengan penambahan bentonit diharapkan akan meningkatkan produksi *syngas* akibat adanya reaksi *catalytic cracking*. Salah satu sifat istimewa yang dimiliki katalis bentonit adalah sifat penukar ion. Pada katalis bentonit, struktur silikon tetrahedral dan aluminium octahedral menyebabkan bentonit memiliki kemampuan substitusi isomorfis. Substitusi isomorfis adalah proses pertukaran ion yang memiliki ukuran yang sama, dimana pada bentonit ion Al^{3+} akan disubstitusi dengan ion Mg^{2+} dan ion Si^{4+} akan disubstitusi dengan ion Al^{3+} . Substitusi ini akan menyebabkan bentonit bermuatan negatif yang kemudian akan berikatan dengan kation H^+ untuk menetralkan muatannya (Bruce C.Gates, 1992).



Gambar 2.6 Mekanisme *catalytic cracking*

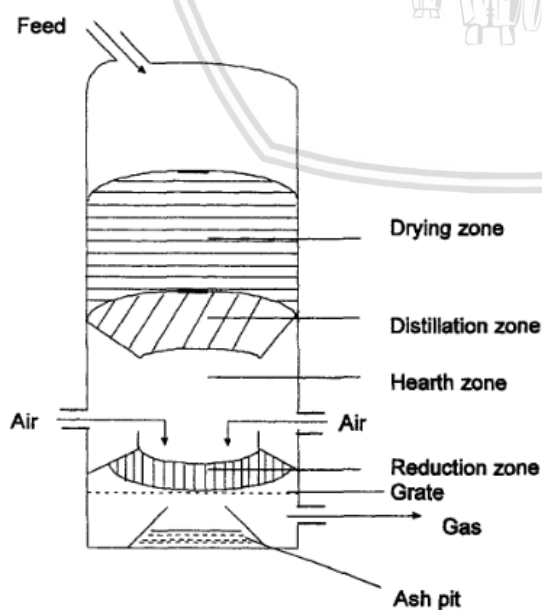
Adanya kation H^+ menyebabkan terjadinya reaksi asam Bronsted site, dimana kation H^+ akan didonorkan kepada biomassa yang telah terdekomposisi sehingga terjadi proses *catalytic cracking*. Proses *catalytic cracking* mampu menurunkan energi aktivasi pada proses dekomposisi hidrokarbon. Reaksi asam Bronsted site terjadi ketika bentonit mendonorkan ion H^+ pada rantai hidrokarbon sehingga menghasilkan karbenium ion, yaitu molekul karbon yang memiliki muatan positif. Karbenium ion bersifat reaktif dan tidak stabil. Mekanisme *catalytic cracking* dapat dilihat pada Gambar 2.6

2.4.3 Jenis-Jenis Gasifikasi

Jenis-jenis gasifier berdasarkan arah aliran fluida dibagi menjadi:

1. Gasifier *downdraft*

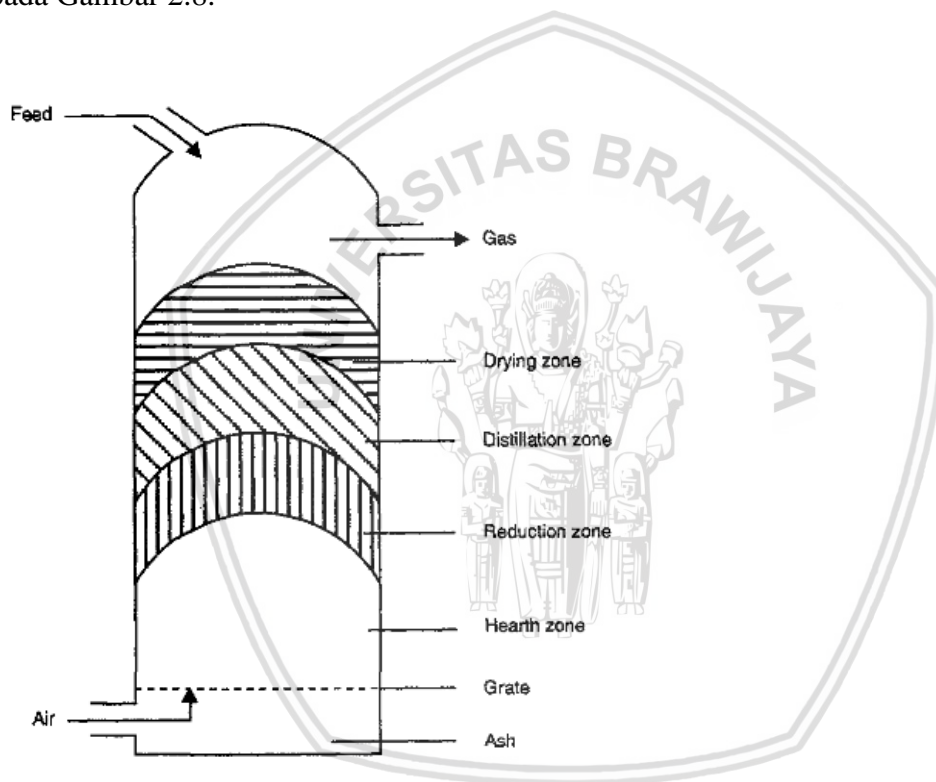
Pada gasifier tipe *downdraft* biomassa dimasukkan melalui atas gasifier dan aliran udara masuk melalui bagian atas atau samping gasifier. Kemudian gas produk hasil gasifikasi dikeluarkan melalui bagian bawah gasifier. Gasifier tipe *downdraft* memiliki kelebihan yaitu produk gas yang dihasilkan memiliki jumlah tar yang lebih rendah sehingga cocok untuk bahan bakar *engine*. Selain itu pada tipe ini juga memiliki kekurangan yaitu hasil gas yang dikeluarkan lebih kotor karena saluran udara keluar yang berada di bawah memungkinkan *char* dan abu untuk ikut terbawa oleh gas. Gambar ilustrasi gasifier *downdraft* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Gasifier *downdraft*
Sumber: Quaak (1999)

2. Gasifier *Updraft*

Gasifier tipe *Updraft* merupakan tipe gasifier yang paling sederhana. Pada gasifier tipe ini biomassa dimasukkan melalui atas gasifier dan aliran udara masuk melalui bagian bawah. Hasil produk gasifikasi dikeluarkan melalui bagian atas gasifier. Pada tipe ini hasil gas yang dihasilkan memiliki kandungan char yang sedikit karena arah aliran gas produk gasifikasi berada di bagian atas sedangkan char dan abu hasil gasifikasi akan berkumpul di bagian bawah gasifier karena pengaruh gravitasi. Kelebihan dari gasifier tipe ini adalah simple dan efisien. Kekurangan dari gasifier tipe ini adalah menghasilkan tar yang tinggi. Gambar ilustrasi gasifier *updraft* dapat dilihat pada Gambar 2.8.

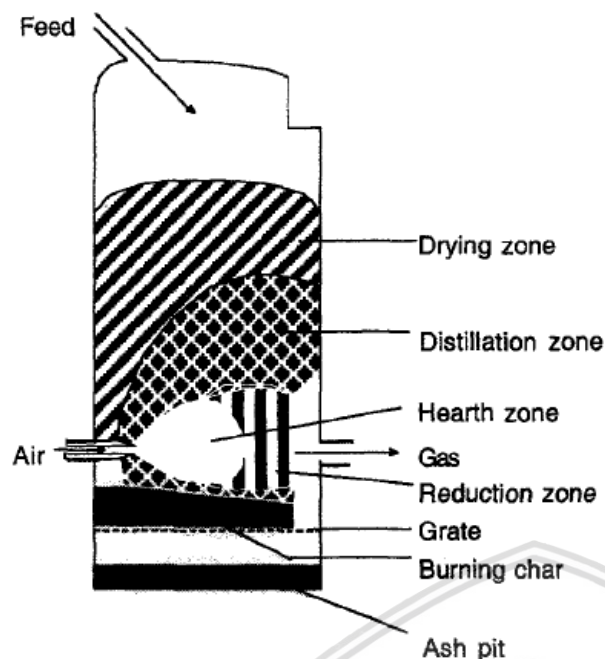


Gambar 2.8 Gasifier *updraft*

Sumber: Quaak (1999)

3. Gasifier *crossdraft*

Gasifier tipe *crossdraft* diadaptasi untuk gasifikasi arang yang bisa mencapai suhu lebih dari 1500°C (Quaak, 1999). Pada tipe ini biomassa dimasukkan melalui bagian atas gasifier sedangkan arah aliran udara bergerak horizontal tegak lurus dengan zona pembakaran. Gambar ilustrasi gasifier *crossdraft* dapat dilihat pada Gambar 2.9.

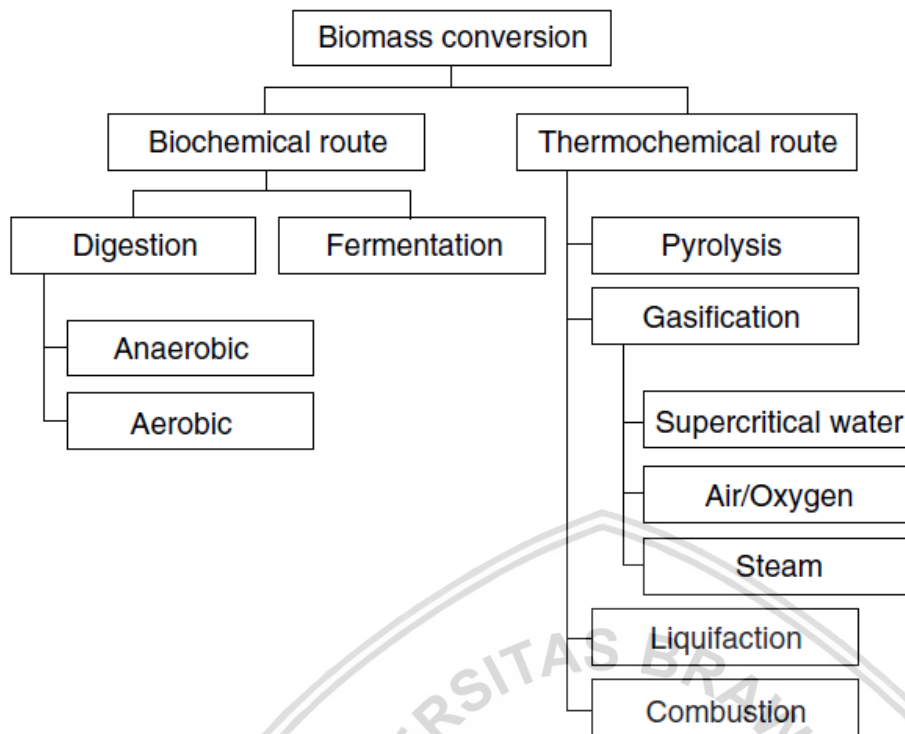


Gambar 2.9 Gasifier crossdraft
Sumber: Quaak (1999)

2.5 Biomassa

Biomassa adalah seluruh material organik yang berasal dari tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme. Produk limbah yang berasal dari industri pertanian, hutan, peternakan juga dapat disebut biomassa. Energi biomassa didapatkan dari cahaya matahari melalui proses yang disebut fotosintesis. Melalui proses fotosintesis, klorofil pada tumbuhan menangkap energi matahari dengan mengubah karbon dioksida dari udara dan air dari tanah menjadi energi berupa karbohidrat, yaitu senyawa kompleks yang tersusun dari karbon, hidrogen, dan oksigen. Saat karbohidrat ini dibakar, mereka kembali menjadi karbon dioksida dan air dan melepaskan energi berupa kalor. Perubahan energi dari cahaya matahari hingga menjadi karbon dioksida, air, dan kalor ini disebut dengan siklus energi biomasa. Dengan cara ini, biomassa dapat berfungsi sebagai penyimpan energi alami untuk menyimpan energi matahari.

Biomassa merupakan salah satu sumber energi tertua yang dikenal oleh manusia, namun kontribusinya terhadap total pemanfaatan energi di Indonesia dan dunia masih kecil (Yulistiani, 2009). Banyaknya jumlah perkebunan, hutan, dan persawahan menyediakan jumlah biomassa sangat besar di Indonesia. Ada beberapa teknologi konversi energi biomasa diantaranya adalah dengan cara biokimia dan termokimia yang turunannya dapat dilihat pada Gambar 2.10. Gasifikasi merupakan salah satu teknologi konversi biomassa secara termokimia.



Gambar 2.10 Macam-macam metode konversi biomassa
Sumber: Basu (2010)

2.6 Tandan Kosong Kelapa Sawit

Tandan kosong kelapa sawit merupakan salah satu limbah hasil industri kelapa sawit yang jumlahnya paling besar. Pada proses pengolahan kelapa sawit, setiap 1 ton kelapa sawit menghasilkan limbah berupa tandan kosong 23%, cangkang 6,5%, serabut 13%, limbah cair 50%, dan *wet decanter solid* (lumpur sawit) 4% (Ditjen PPHP, 2006). Limbah padat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat yang jumlahnya cukup besar yaitu sekitar 6 juta ton pada tahun 2006, namun pemanfaatannya masih terbatas. TKKS sendiri memiliki nilai kalori sebesar 1200 Kkal/Kg.

Selama ini pemanfaatan tandan kosong kelapa sawit masih kurang optimal karena hanya dimanfaatkan dengan membakarnya secara langsung atau dijadikan mulsa. Dari Tabel 2.5 dapat dilihat properti dari tandan kosong kelapa sawit. *Ultimate analysis* adalah metode analisis material dimana komponen material berupa padat hingga gas diperhitungkan dalam analisisnya yang bertujuan untuk mendapatkan kandungan kimia material. Sedangkan *proximate analysis* adalah metode pengujian material yang menganalisis *fixed carbon*, zat terbang (*volatile matter*), kadar air, dan persen abu. Zat terbang adalah zat yang menguap ketika dipanaskan, sedangkan *fixed carbon* adalah bahan bakar padat yang tertinggal dalam tungku pembakaran setelah zat terbang menguap.

Tabel 2.5

Analisis *Proximate* dan *Ultimate* Tandan Kosong Kelapa Sawit

Analisa/Parameter	Tandan Kosong Kelapa Sawit
<i>Proximate</i>	
Kadar air (%)	5,18
Zat terbang (%)	82,8
Abu (%)	3,45
Karbon tetap (%)	8,97
<i>Ultimate</i>	
C (%)	46,62
H (%)	6,45
N (%)	1,21
S (%)	0,035
O (%)	45,66
Nilai kalor (kJ/g)	17,02

Sumber: Mohammed et al (2012)

2.7 Syngas

Syngas merupakan gas produk dari proses gasifikasi. Pada proses gasifikasi, biomasa pada gasifier menerima energi panas dari *heater* sehingga biomasa akan terdekomposisi menjadi gas dan padatan dalam bentuk char/abu. Gas pada proses gasifikasi ini masih mengandung beberapa gas yang masih bisa berubah fasa menjadi cair. Oleh karena itu diperlukan proses kondensasi untuk mengembunkan gas tersebut sehingga gas yang dihasilkan adalah gas mampu bakar yang tidak bisa terkondensasi.

Syngas terdiri atas campuran gas hidrogen, metana, dan karbon monoksida. *Syngas* merupakan salah satu bahan utama yang digunakan pada industri bahan kimia. Selain itu *syngas* juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk proses manufaktur dan sebagai pembangkit. *Syngas* dapat diproduksi dari berbagai macam bahan organik seperti batu bara dan biomassa. Produk *syngas* yang dihasilkan dari gasifikasi berbeda beda tergantung dari bahan baku dan kondisi pada saat proses gasifikasi. Gas pada proses gasifikasi mengandung banyak campuran gas seperti uap air, karbon monoksida, karbon dioksida, hidrogen, metana, dan gas pengotor lainnya. Pada campuran gas tersebut gas hidrogen, karbon monoksida, dan metana harus dipisahkan untuk menghasilkan *syngas*.

2.8 Hipotesis

Pada proses gasifikasi tandan kosong kelapa sawit, penambahan katalis bentonit dapat mempercepat proses gasifikasi, meningkatkan volume dan komposisi gas hasil gasifikasi. Hal ini terjadi karena adanya bentonit menyebabkan terjadinya reaksi *catalytic cracking* dan

kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 pada bentonit dapat meningkatkan laju pemanasan pada proses gasifikasi dan sehingga proses gasifikasi menjadi lebih cepat dan mampu menaikkan volume dan komposisi gas yang dihasilkan.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian yang dilakukan kali ini adalah penelitian eksperimental (*experimental research*). Dalam penelitian ini peneliti menggunakan biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) untuk digunakan menjadi bahan bakar alternative dengan bantuan katalis bentonit dengan variasi kadar bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%. Proses gasifikasi menggunakan metode gasifikasi *updraft*.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Motor Bakar Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang. Dilaksanakan pada bulan Januari 2018 sampai Juli 2018.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Variabel bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah kadar bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50% dari berat biomassa.

2. Variabel terikat

Variabel terikat pada penelitian ini adalah komposisi *syngas* hasil gasifikasi, volume gas total yang dihasilkan, dan laju pemanasan.

3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol pada penelitian ini adalah:

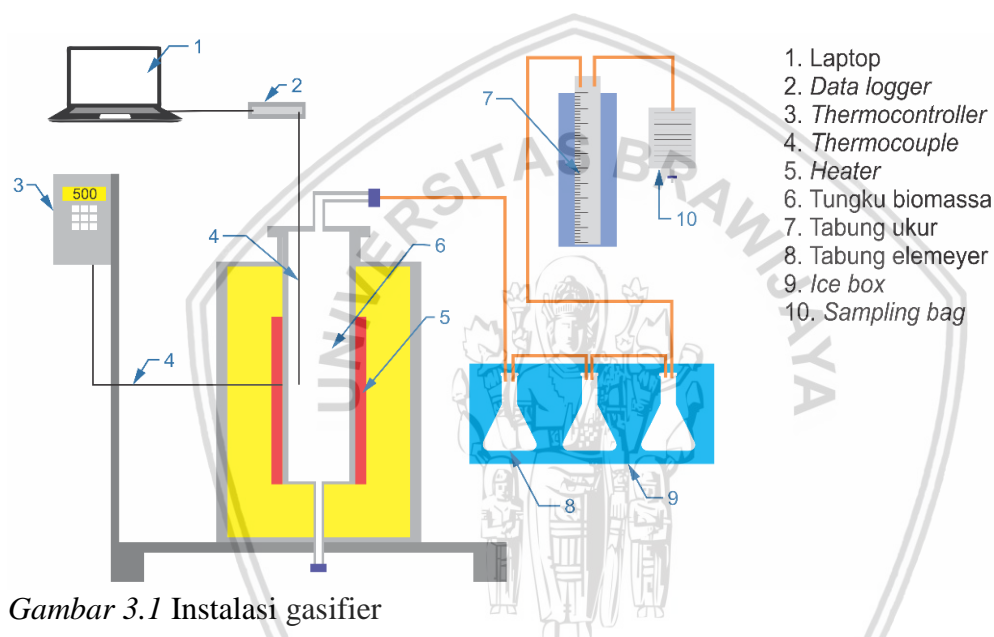
- a. Temperatur awal gasifikasi 25° C – 27° C
- b. Temperatur gasifikasi 500° C
- c. Waktu gasifikasi 2 jam
- d. Berat spesimen tandan kosong kelapa sawit adalah 200 gram

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat Penelitian

1. Gasifier

Gasifier yang digunakan dalam penelitian ini adalah gasifier *updraft*. Gasifier digunakan dalam proses gasifikasi untuk memanaskan biomassa dalam kondisi udara dibawah stoikiometri. Tandan kosong kelapa sawit dan bentonit yang sebelumnya telah diaktivasi dan di jaga kadar airnya dimasukkan ke dalam gasifier dan mulai dipanaskan kemudian ditahan pada suhu 500°C menggunakan *thermocontroller*. Instalasi gasifier bisa dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Instalasi gasifier

Penjelasan gambar:

1. Laptop

Laptop digunakan untuk menampilkan data hasil proses data *logger*. Data yang ditampilkan berupa grafik fungsi suhu terhadap waktu. Minimum spesifikasi laptop yang bisa dipakai yaitu.

CPU : Intel Dual Core 6600

RAM : 2 Gb

OS : Windows 7

2. Data logger

Data *logger* digunakan untuk mengukur suhu di dalam gasifier dan juga untuk mengetahui laju pemanasan pada proses gasifikasi.

Spesifikasi data *logger*:

- a. *Channels* : 16 single-ended/8 differential (Software programmable)
- b. *Resolution* : 16 bits
- c. *Max sampling rate* : 10 samples/s (total)

3. *Thermocontroller*

Thermocontroller digunakan untuk mengatur arus yang masuk ke dalam *heater* sehingga dapat mengatur suhu dalam gasifier. *Thermocontroller* ini juga berfungsi sebagai saklar dari gasifier.

4. *Thermocouple*

Thermocouple digunakan untuk mengukur temperatur pada gasifier. *Thermocouple* yang digunakan adalah tipe K dengan jumlah 2 buah. *Thermocouple* pertama digunakan untuk mengukur suhu *heater* dan yang kedua digunakan untuk mengukur suhu biomassa.

5. *Heater*

Heater digunakan sebagai sumber panas pada gasifier yang berupa kumparan yang memiliki hambatan untuk mengubah energi listrik menjadi kalor.

6. Tungku biomassa/*furnace*

Tungku biomassa/*furnace* digunakan sebagai tempat biomassa dipanaskan. Tungku biomassa/*furnace* berbentuk silinder dengan diameter 20 cm.

7. Tabung Ukur

Tabung ukur digunakan untuk mengukur volume gas hasil gasifikasi yang telah dikondensasi.

8. Tabung Elemeyer

Tabung elemeyer digunakan sebagai tempat kondensasi untuk menampung tar pada saat proses gasifikasi. Tabung elemeyer yang digunakan berjumlah 3 buah dengan kapasitas 200 ml.

9. *Ice box*

Ice box berisi es batu yang digunakan untuk mengkondensasi gas hasil gasifikasi

10. *Sampling Bag*

Sampling bag digunakan untuk menampung sampel hasil gasifikasi yang telah dikondensasi. *Sampling bag* yang dipakai terbuat dari bahan polipropilen dengan kapasitas 1 liter.

2. Timbangan Elektrik

Timbangan elektrik digunakan untuk mengukur berat tandan kosong kelapa sawit dan bentonit.

3. Dapur listrik

Dapur listrik digunakan untuk proses pengeringan tandan kosong kelapa sawit dan untuk mengaktivasi bentonit.

4. *Gas Chromatography* (GC)

Gas Chromatography digunakan untuk menganalisa komposisi kimia gas hasil gasifikasi. *Gas Chromatography* yang digunakan yaitu merk SIMADZU 2010.

3.4.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Tandan kosong kelapa sawit digunakan sebagai spesimen pada penelitian gasifikasi. Tandan kosong kelapa sawit yang digunakan berasal dari daerah Kalimantan.

2. Serbuk Bentonit

Serbuk bentonit digunakan sebagai katalis pada proses gasifikasi tandan kosong kelapa sawit.

3.5 Prosedur Penelitian

1. Proses pembersihan tandan kosong kelapa sawit

Tandan kosong kelapa sawit dibersihkan untuk menghilangkan kotoran-kotoran agar tidak ikut terbawa saat proses gasifikasi.

2. Proses pemotongan tandan kosong kelapa sawit

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dipotong-potong dengan ukuran sekitar ± 3 cm untuk menyeragamkan ukuran.

3. Proses penyaringan serbuk bentonit

Serbuk bentonit disaring agar bersih dari kotoran dan untuk menyeragamkan ukuran.

4. Proses pengeringan tandan kosong kelapa sawit

Pengeringan tandan kosong kelapa sawit dilakukan dengan menggunakan dapur listrik dengan temperatur 100°C selama 2 jam.

5. Proses pemanasan serbuk bentonit

Serbuk bentonit diaktivasi dengan dengan cara dipanaskan menggunakan dapur listrik pada suhu 300°C selama 2 jam.

6. Proses pembuatan spesimen

Setelah tandan kosong kelapa sawit dan serbuk bentonit dipanaskan, maka dilakukan penimbangan sesuai dengan variasi spesimen pertama yaitu tandan kosong kelapa sawit 200 gram dan bentonit 10% dari berat tandan kosong kelapa sawit.

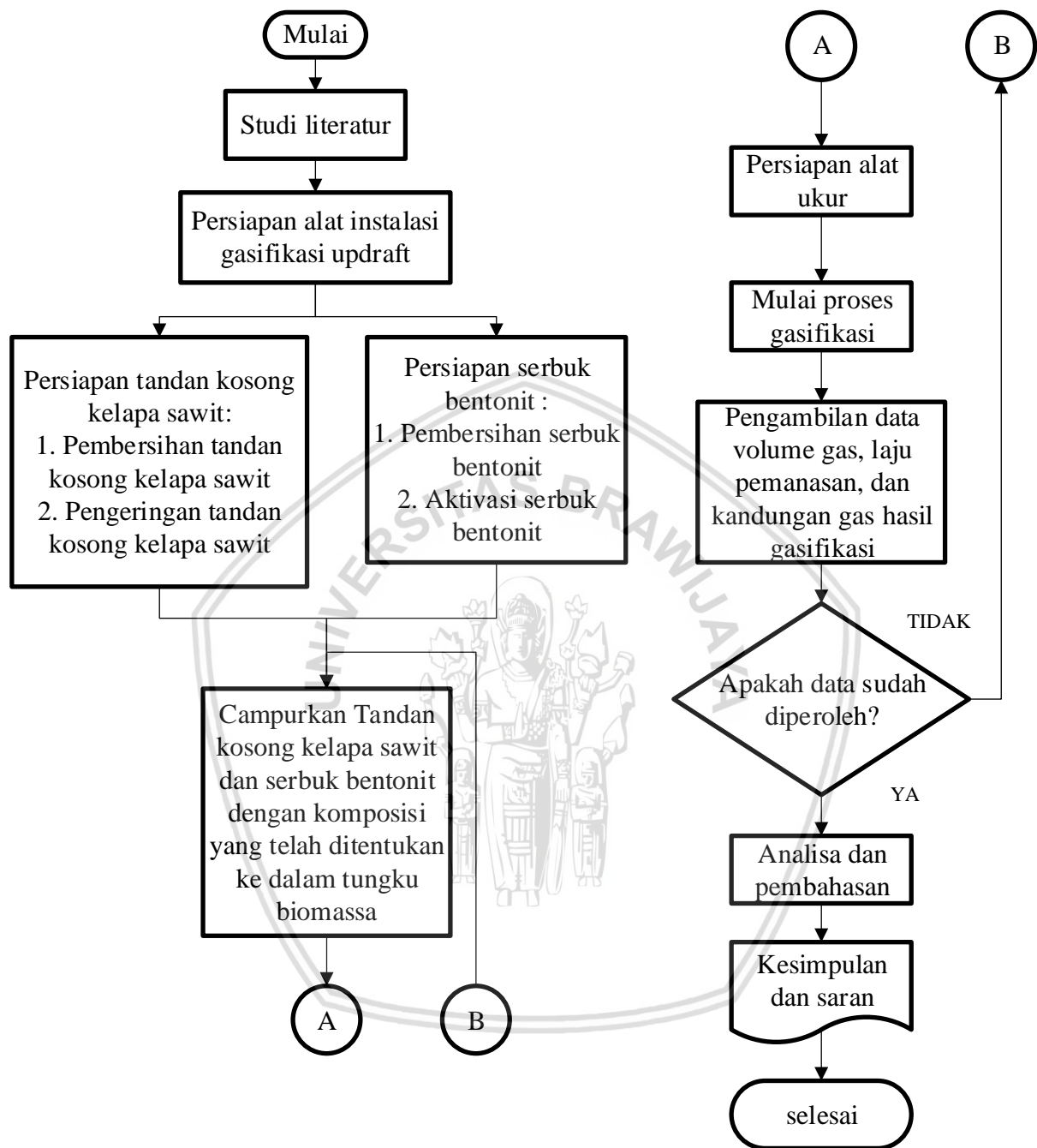
7. Proses persiapan gasifier

- a. Pasang *thermocouple* pada *data logger* kemudian hubungkan *data logger* pada laptop
- b. Masukkan es batu pada *ice box*

8. Proses gasifikasi

- a. Setelah gasifier disiapkan, buka tungku biomassa
- b. Serbuk bentonit dan tandan kosong kelapa sawit dicampur merata kemudian dimasukkan ke dalam tungku biomassa/*furnace*
- c. Pasang *sealant* di antara tungku dan penutup tungku untuk menghindari kebocoran, Kemudian tutup dengan rapat
- d. Setelah tungku biomassa/*furnace* tertutup, jalankan *thermocontroller* dan atur pada suhu 500°C
- e. Setelah gasifier berjalan, catat waktu produksi gas setiap 830,5 cm³
- f. Ketika suhu sudah mencapai 500°C, pasang *sampling bag* untuk menyimpan sampel gas
- g. Ulangi proses gasifikasi dengan variasi kadar bentonit selanjutnya yaitu 0%, 30% dan 50%

3.6 Diagram Alir Penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

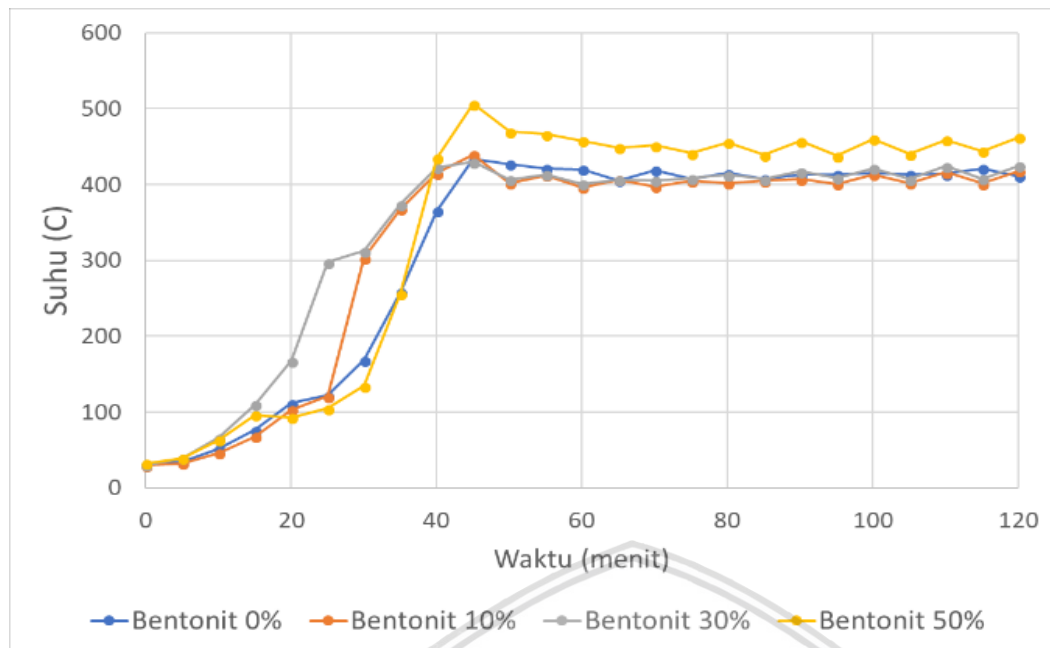
Data hasil penelitian dari gasifikasi *updraft* tandan kosong kelapa sawit dengan penambahan katalis bentonit sebanyak 0%, 10%, 30%, dan 50% akan ditampilkan dalam bentuk gambar analisis grafik. Data yang diperoleh dari penelitian ini berupa data temperatur terhadap waktu pada variasi kadar bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%; Debit *syngas* setiap 5 menit dari proses gasifikasi selama 2 jam pada variasi kadar bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%; persentase berat hasil char, tar, dan *syngas* pada variasi kadar bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%; dan komposisi *syngas* hasil gasifikasi pada variasi kadar bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%. Data temperatur terhadap waktu selanjutnya akan diolah untuk membuat grafik laju pemanasan biomassa terhadap waktu. Kemudian data komposisi *syngas* hasil gasifikasi akan diolah untuk membuat grafik nilai kalor *syngas* pada setiap variasi penambahan bentonit.

4.2 Pembahasan dan Analisa Grafik

4.2.1 Analisis Histori Temperatur Biomassa

Setelah dilakukan gasifikasi tandan kosong kelapa sawit dengan variasi penambahan bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%, didapatkan data kenaikan temperatur biomassa tiap 10 detik yang telah terekam dalam data *logger*. Data yang diperoleh kemudian akan diolah untuk dijadikan data kenaikan temperatur setiap 5 menit. Dari data kenaikan temperatur tersebut dibuat grafik temperatur biomassa terhadap waktu untuk setiap variasi penambahan bentonit.

Grafik akan menunjukkan pengaruh penambahan katalis bentonit terhadap kenaikan temperatur biomassa pada saat proses gasifikasi berlangsung. Dimana pada sumbu Y akan menunjukkan temperatur biomassa pada saat proses gasifikasi, sedangkan sumbu X akan menunjukkan waktu dari proses gasifikasi biomassa. Gambar grafik hubungan temperatur biomassa terhadap waktu pada variasi penambahan bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50% dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hubungan temperatur biomassa terhadap waktu pada variasi penambahan bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa penambahan katalis bentonit pada proses gasifikasi tandan kosong kelapa sawit mempengaruhi kenaikan temperatur biomassa. Pada kurva menunjukkan bahwa semakin curam kurva, maka kenaikan temperatur semakin cepat. Dari grafik dapat dilihat bahwa kenaikan temperatur paling cepat terjadi pada variasi penambahan bentonit 50% lalu diikuti oleh variasi penambahan bentonit 30%, 10%, dan 0%.

Pada penambahan bentonit 50%, kenaikan temperatur hingga menit ke 30 lebih lambat dari pada variasi 0%, 10%, dan 30 %, akan tetapi pada menit 40 mampu mencapai suhu tertinggi diantara semua variasi hingga mampu mencapai suhu *holding* yang paling tinggi diantara variasi yang lain. Hal ini terjadi karena pada penambahan bentonit 50%, total massa spesimen yang dipanaskan menjadi yang paling tinggi dibandingkan dengan variasi yang lain. Dengan semakin banyak massa spesimen yang dipanaskan, maka beban pemanasan juga akan semakin tinggi, sehingga pada menit ke 30 kenaikan temperaturnya lebih lambat jika dibandingkan variasi yang lain. Dari data tersebut kita dapat menghitung laju pemanasan dari masing-masing variasi penambahan katalis, yaitu

- Laju pemanasan pada penambahan bentonit 0%

$$\frac{dT}{dt} = \frac{365,32^{\circ}\text{C}}{40 \text{ menit}} = 9,813^{\circ}\text{C/menit}$$

- Laju pemanasan pada penambahan bentonit 10%

$$\frac{dT}{dt} = \frac{415,22^{\circ}\text{C}}{40 \text{ menit}} = 10,338^{\circ}\text{C/menit}$$

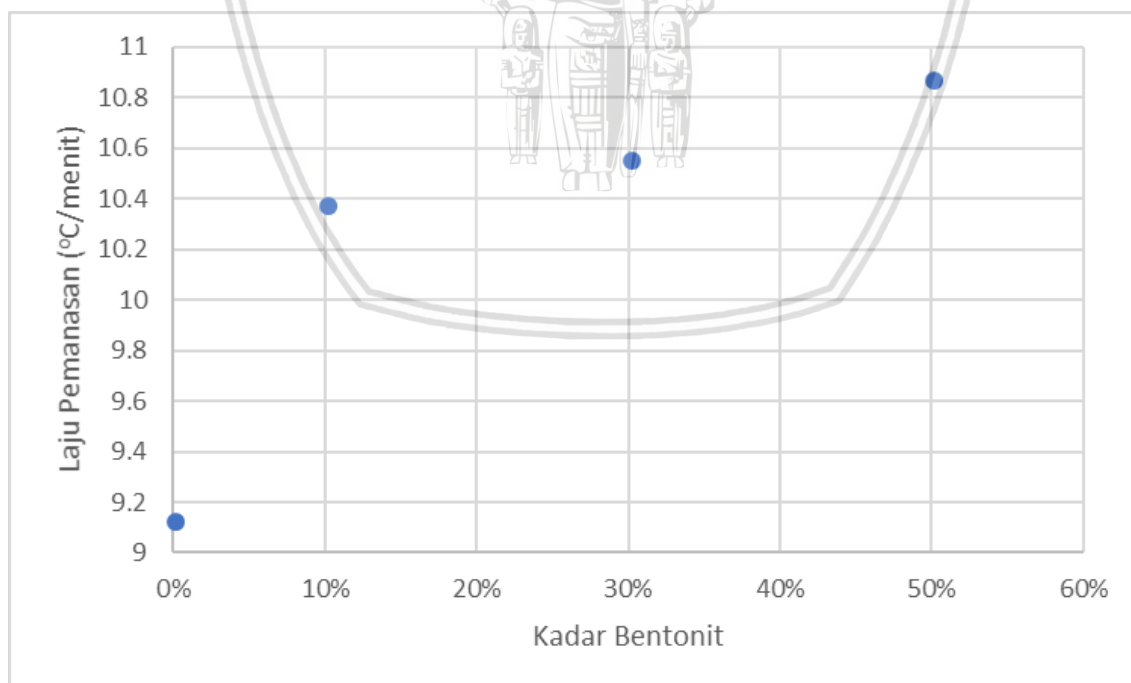
- Laju pemanasan pada penambahan bentonit 30%

$$\frac{dT}{dt} = \frac{422,58^{\circ}\text{C}}{40 \text{ menit}} = 10,56^{\circ}\text{C/menit}$$

- Laju pemanasan pada penambahan bentonit 50%

$$\frac{dT}{dt} = \frac{435,2^{\circ}\text{C}}{40 \text{ menit}} = 10,88^{\circ}\text{C/menit}$$

Dari perhitungan laju pemanasan diatas dibuatlah grafik perbandingan grafik laju pemanasan pada masing-masing variasi penambahan bentonit yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 Dari grafik laju pemanasan dapat dilihat bahwa penambahan katalis bentonit pada proses gasifikasi mampu meningkatkan laju pemanasan biomassa sehingga tandan kosong kelapa sawit lebih cepat mencapai temperatur yang diinginkan. Hal ini dikarenakan SiO_2 dan Al_2O_3 pada bentonit mengisi celah-celah udara antar biomassa sehingga menggantikan udara yang memiliki konduktivitas termal lebih rendah. kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 yang memiliki konduktivitas termal lebih tinggi dari pada udara mampu menaikkan konduktivitas termal pada biomassa, sehingga transfer kalor dari *heater* menuju biomassa menjadi lebih cepat. Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa penambahan katalis bentonit pada proses gasifikasi mampu mempercepat kenaikan temperatur biomassa dalam tungku.



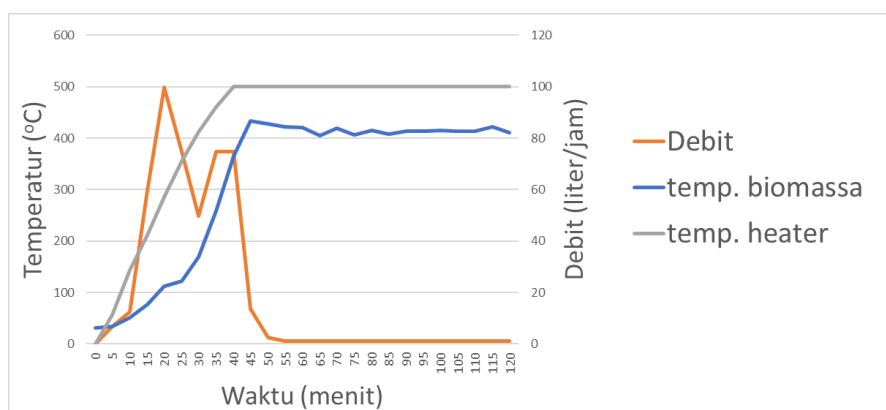
Gambar 4.2 Laju pemanasan gasifikasi *updraft* tandan kosong kelapa sawit pada variasi penambahan bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%

4.2.2 Analisis Debit Syngas

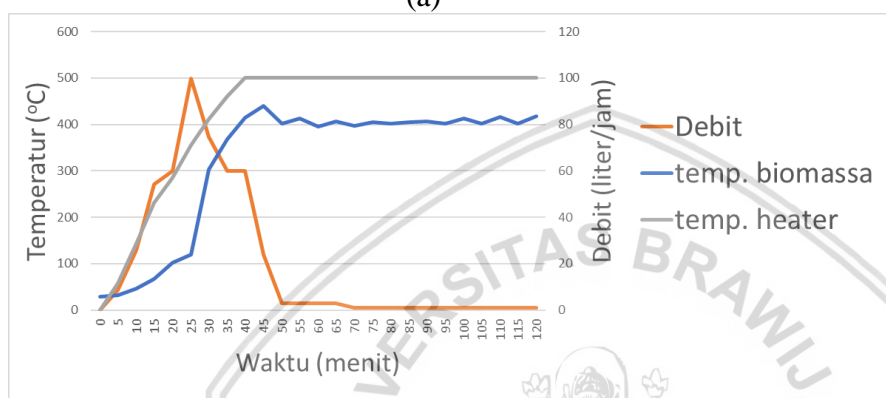
Saat proses gasifikasi berlangsung, dilakukan pengukuran volume *syngas* setiap mencapai 0.830 liter. Kemudian data volume tersebut diolah sehingga menjadi data debit *syngas*. Setelah didapatkan data debit *syngas*, maka dari data tersebut dibuat grafik debit *syngas* terhadap kenaikan temperatur biomassa untuk setiap variasi penambahan bentonit. Grafik hubungan antara debit *syngas* yang dihasilkan terhadap kenaikan temperatur biomassa pada tiap variasi penambahan bentonit dapat dilihat pada Gambar 4.3. Dari grafik dapat dilihat bahwa terdapat pengaruh penambahan katalis bentonit terhadap debit *syngas* dan histori temperatur biomassa. Semakin tinggi kadar bentonit maka debit gas yang dihasilkan semakin tinggi, hal tersebut disebabkan karena dengan semakin tinggi kadar bentonit maka bidang kontak antara biomassa dengan katalis akan semakin banyak dan mengakibatkan reaksi *catalytic cracking* semakin banyak. *Catalytic cracking* terjadi saat katalis bentonit mendonorkan proton (ion H^+) pada biomassa yang telah terdekomposisi sehingga menjadi bermuatan dan lebih mudah terurai. Secara berurutan rata-rata debit dari yang tertinggi adalah pada variasi 50% bentonit, 30% bentonit, 10% bentonit, dan 0% bentonit yaitu 25,37 liter/jam; 22,92 liter/jam; 20,77 liter/jam; dan 20,20 liter/jam.

Pada penambahan bentonit 50%, debit tertinggi yaitu sebesar 149,49 liter/jam. Pada penambahan bentonit 30%, 10%, dan 0% debit tertinggi yang tercatat yaitu sebesar 99,66 liter/jam. Dari ke-empat variasi dapat dilihat bahwa debit tertinggi terjadi pada saat suhu *heater* mencapai sekitar 300°C. Debit yang tinggi dikarenakan unsur *volatile matter* tandan kosong kelapa sawit terdekomposisi optimal pada suhu sekitar 300°C. Proses dekomposisi akibat temperatur dinamakan *thermal cracking*.

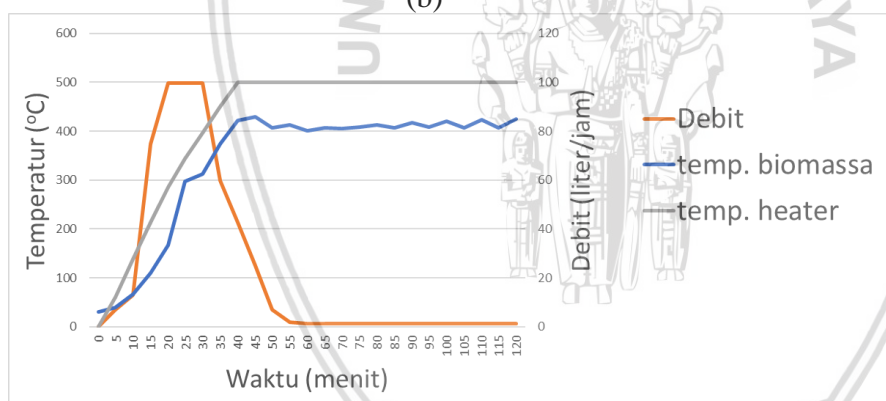
Proses *thermal cracking* mengakibatkan rantai panjang hidrokarbon pada biomassa terputus menjadi radikal bebas. Radikal bebas merupakan molekul yang tidak memiliki pasangan elektron sehingga bersifat reaktif. Radikal bebas selanjutnya akan mengalami reaksi *alpha-scission* dan *beta-scission*. *Alpha-scission* merupakan proses pemutusan 1 atom C pada molekul radikal bebas yang menghasilkan metil radikal. Terbentuknya metil radikal mampu mengekstrak atom hidrogen dari molekul hidrokarbon netral sehingga menghasilkan metana (CH_4) dan radikal bebas sekunder. *Beta-scission* merupakan proses pemutusan 2 atom C pada molekul radikal bebas yang menghasilkan olefin dan radikal bebas primer. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan bentonit pada proses gasifikasi tandan kosong kelapa sawit mampu meningkatkan debit *syngas* yang dihasilkan.



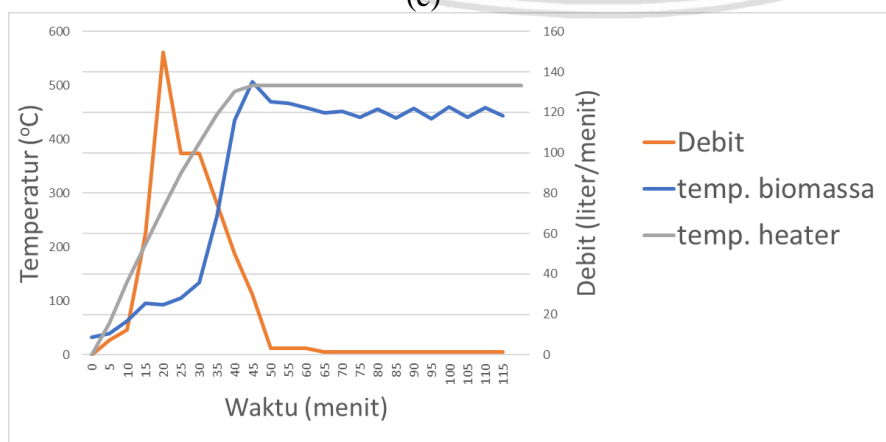
(a)



(b)



(c)



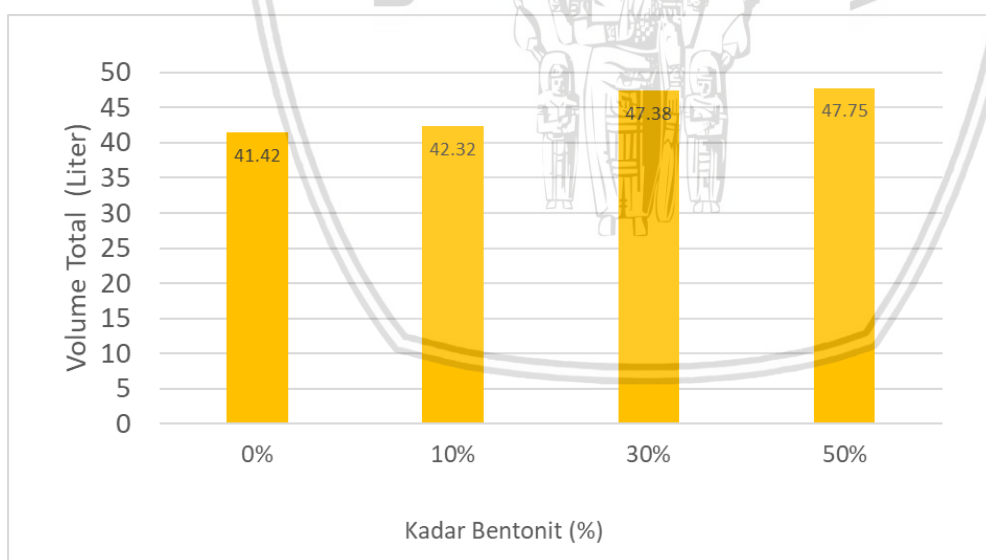
(d)

Gambar 4.3 Grafik hubungan temperatur biomassa terhadap debit syngas pada variasi (a) 0% Bentonit, (b) 10% Bentonit, (c) 30% Bentonit, dan (d) 50% Bentonit

4.2.3 Analisis Volume Syngas

Perbandingan volume *syngas* yang dihasilkan pada penambahan katalis bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50% dapat dilihat pada Gambar 4.4. Dari data yang ditampilkan dalam grafik dapat dilihat bahwa pada setiap penambahan kadar bentonit, *syngas* yang dihasilkan semakin banyak, hal tersebut sesuai dengan grafik sebelumnya dimana dengan seiring bertambahnya kadar bentonit maka rata-rata debit juga akan naik. Dengan naiknya debit maka total *syngas* yang akan dihasilkan juga akan naik. Naiknya kadar bentonit menyebabkan reaksi *catalytic cracking* yang terjadi semakin banyak dan mengoptimalkan proses dekomposisi biomassa.

Kenaikan hasil *syngas* pada penambahan bentonit sebanyak 10% tidak terlalu signifikan yaitu dari 41,42 L menjadi 42,32 L atau mengalami kenaikan sebesar 2,1 %. Pada penambahan katalis 30% terjadi kenaikan volume yang cukup tinggi yaitu dari 41,42 L menjadi 47,38 L atau naik sebesar 14,3% dan volume terbanyak dihasilkan pada penambahan bentonit 50% yaitu 47,75 L atau naik sebesar 15,2%. Dari grafik dapat disimpulkan bahwa penambahan katalis bentonit mampu menaikkan volume *syngas* yang dihasilkan, hal tersebut terjadi karena bentonit menyebabkan terjadinya *catalytic cracking* sehingga biomassa yang terdekomposisi lebih banyak.



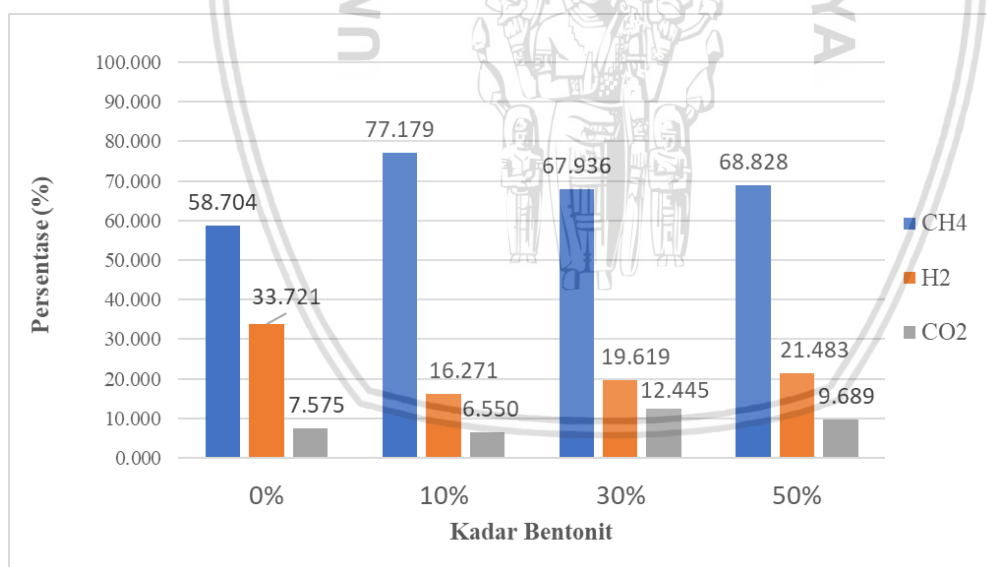
Gambar 4.4 Grafik hubungan persentase bentonit terhadap volume *syngas*

4.2.4 Analisis Komposisi Syngas

Grafik perbandingan komposisi kandungan *syngas* pada penambahan bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50% dapat dilihat pada Gambar 4.5. Dapat dilihat bahwa biomassa dengan penambahan katalis bentonit menghasilkan kandungan metana yang lebih besar dibandingkan dengan biomassa tanpa bentonit. Kandungan gas metana tertinggi dihasilkan

pada variasi penambahan bentonit 10%, yaitu mencapai 77,179% kemudian diikuti dengan variasi 50% dan 30% dengan persentase metana 68,828% dan 67,936%. Meningkatnya komposisi metana disebabkan karena proses *catalytic cracking*.

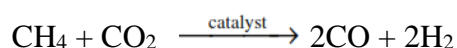
Pada penambahan bentonit 10% membantu proses dekomposisi gas dikarenakan adanya proses *catalytic cracking*. Dengan adanya proses *catalytic cracking* akan mengakibatkan terbentuknya ion karbenium yang membantu memecah rantai panjang hidrokarbon lebih mudah. Pada penambahan bentonit 30% dan 50% pada biomassa mengakibatkan komposisi gas metana cenderung turun dan komposisi gas hidrogen meningkat jika dibandingkan dengan penambahan katalis 10%. Hal ini disebabkan oleh dua kemungkinan yaitu yang pertama dikarenakan pada penambahan katalis bentonit 30% dan 50% debit produksi *syngas* meningkat seperti yang bisa dilihat pada gambar 4.3. Peningkatan debit *syngas* menyebabkan gas lebih cepat keluar dari dalam tungku dan menyebabkan turunnya laju reaksi pembentukan metana. Hal ini dikarenakan pembentukan gas metana yang cenderung lambat. Kemudian yang kedua karena adanya proses *dry reforming* dan *steam reforming* yaitu proses reaksi antara metana dengan CO₂ dan H₂O yang menghasilkan gas H₂.



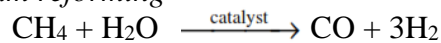
Gambar 4.5 Grafik hubungan persentase bentonit terhadap komposisi kandungan *syngas*

Adanya katalis yang berlebih akan membuat reaksi *steam reforming* dan *dry reforming* menjadi lebih mudah terjadi. Proses *steam reforming* dan *dry reforming* ditunjukkan pada persamaan berikut. Proses *steam reforming* dan *dry reforming* ditunjukkan pada persamaan berikut.

dry reforming



steam reforming



Dari data komposisi *syngas* dapat dihitung nilai kalor *syngas* dari masing-masing variasi. Untuk menghitung nilai kalor gas, persentase mol dikalikan dengan nilai kalor (LHV) dari masing-masing gas yaitu metana 35,8 MJ/m³ dan hidrogen 10,8 MJ/m³ kemudian hasilnya akan dijumlahkan. Berikut ini adalah perhitungan nilai kalor *syngas* pada setiap variasi.

- Bentonit 0%

$$\begin{aligned}\text{Nilai kalor CH}_4 &= \% \text{mol CH}_4 \times \text{LHV CH}_4 \\ &= 58,704\% \times 35,8 \text{ MJ/m}^3 \\ &= 21,01 \text{ MJ/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Nilai kalor H}_2 &= \% \text{mol H}_2 \times \text{LHV H}_2 \\ &= 33,721 \times 10,7844 \text{ MJ/m}^3 \\ &= 3,64 \text{ MJ/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Nilai kalor total} &= \text{Nilai kalor CH}_4 + \text{Nilai kalor H}_2 \\ &= 21,01 \text{ MJ/m}^3 + 3,64 \text{ MJ/m}^3 \\ &= 24,65 \text{ MJ/m}^3\end{aligned}$$

- Bentonit 10%

$$\begin{aligned}\text{Nilai kalor CH}_4 &= \% \text{mol CH}_4 \times \text{LHV CH}_4 \\ &= 77,179\% \times 35,8 \text{ MJ/m}^3 \\ &= 27,63 \text{ MJ/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Nilai kalor H}_2 &= \% \text{mol H}_2 \times \text{LHV H}_2 \\ &= 16,271 \times 10,8 \text{ MJ/m}^3 \\ &= 1,75 \text{ MJ/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Nilai kalor total} &= \text{Nilai kalor CH}_4 + \text{Nilai kalor H}_2 \\ &= 27,63 \text{ MJ/m}^3 + 1,75 \text{ MJ/m}^3 \\ &= 29,38 \text{ MJ/m}^3\end{aligned}$$

- Bentonit 30%

$$\begin{aligned}\text{Nilai kalor CH}_4 &= \% \text{mol CH}_4 \times \text{LHV CH}_4 \\ &= 67,936\% \times 35,8 \text{ MJ/m}^3 \\ &= 24,32 \text{ MJ/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Nilai kalor H}_2 &= \% \text{mol H}_2 \times \text{LHV H}_2 \\ &= 19,619 \times 10,8 \text{ MJ/m}^3 \\ &= 2,11 \text{ MJ/m}^3\end{aligned}$$

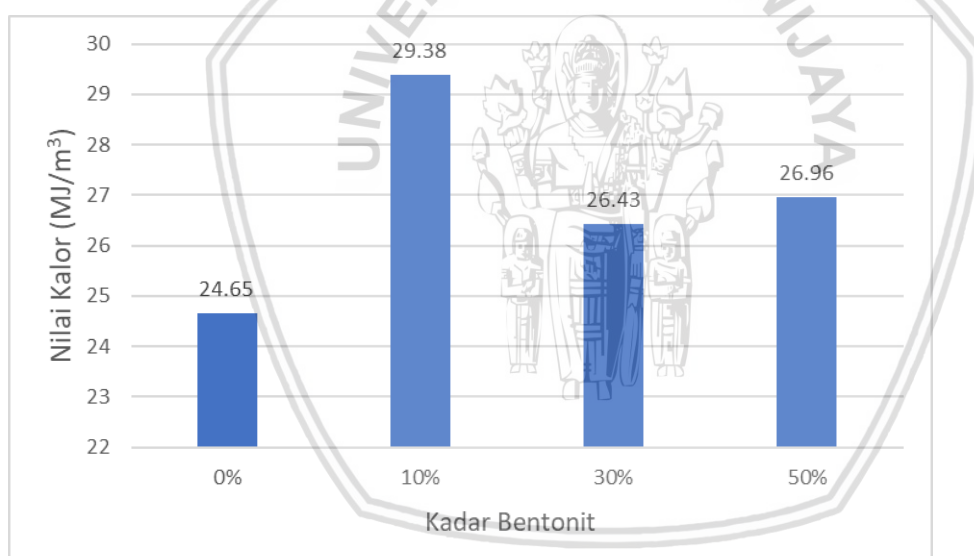
$$\begin{aligned}
 \text{Nilai kalor total} &= \text{Nilai kalor CH}_4 + \text{Nilai kalor H}_2 \\
 &= 24,32 \text{ MJ/m}^3 + 2,11 \text{ MJ/m}^3 \\
 &= 26,43 \text{ MJ/m}^3
 \end{aligned}$$

- Bentonit 50%

$$\begin{aligned}
 \text{Nilai kalor CH}_4 &= \% \text{mol CH}_4 \times \text{LHV CH}_4 \\
 &= 68,828\% \times 35,8 \text{ MJ/m}^3 \\
 &= 24,64 \text{ MJ/m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Nilai kalor H}_2 &= \% \text{mol H}_2 \times \text{LHV H}_2 \\
 &= 21,483 \times 10,8 \text{ MJ/m}^3 \\
 &= 2,32 \text{ MJ/m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Nilai kalor total} &= \text{Nilai kalor CH}_4 + \text{Nilai kalor H}_2 \\
 &= 24,64 \text{ MJ/m}^3 + 2,32 \text{ MJ/m}^3 \\
 &= 26,96 \text{ MJ/m}^3
 \end{aligned}$$

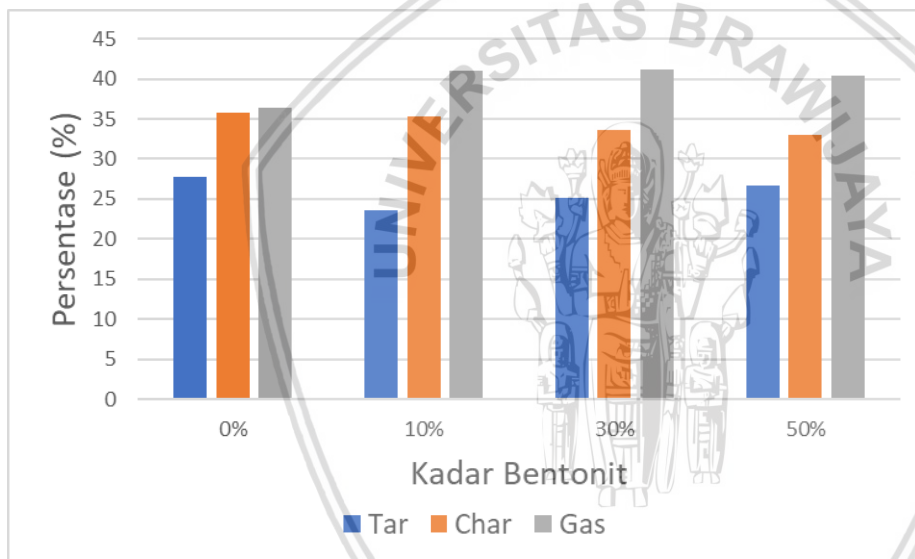


Gambar 4.6 Grafik perbandingan nilai kalor pada variasi penambahan bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50%

Grafik perbandingan nilai kalor *syngas* pada masing-masing variasi dapat dilihat pada Gambar 4.6. Dari grafik dapat dilihat bahwa nilai kalor tertinggi didapatkan pada variasi penambahan bentonit 10% dengan nilai kalor 29,38 MJ/m³ kemudian diikuti oleh variasi penambahan bentonit 50%, 30%, dan 0% dengan masing-masing nilai kalor 26,96 MJ/m³, 26,43 MJ/m³, 24,65 MJ/m³. Hasil perhitungan nilai kalor dipengaruhi oleh kandungan gas metana. Hal ini dikarenakan komposisi utama yang terkandung dalam *syngas* adalah gas metana dan juga nilai kalor gas metana yang tinggi dibandingkan gas hidrogen.

4.2.5 Analisis Hasil Tar, Char, dan Syngas

Gasifikasi menghasilkan produk berupa gas mampu bakar yang dinamakan dengan *syngas*. Selain itu proses gasifikasi juga menghasilkan produk sampingan berupa tar dan char. Tar merupakan hasil dari kondensasi gas yang keluar dari gasifier sedangkan char merupakan produk sisa dari biomassa yang tidak berubah menjadi gas. Perbandingan komposisi tar, char, dan gas pada variasi penambahan bentonit 0%, 10%, 30%, dan 50% dapat dilihat pada Gambar 4.7. Dari grafik dapat dilihat bahwa dengan semakin banyak penambahan katalis, maka persentase char yang terbentuk semakin sedikit. Hal ini dikarenakan penambahan bentonit pada proses gasifikasi membuat energi aktivasi pada dekomposisi biomassa menjadi lebih rendah. Sehingga membuat biomassa yang terdekomposisi menjadi gas lebih banyak dan menyisakan char yang lebih sedikit.



Gambar 4.7 Grafik hubungan persentase bentonit terhadap komposisi produk hasil gasifikasi

Penambahan bentonit pada proses gasifikasi juga mengakibatkan produksi tar menurun jika dibandingkan dengan tanpa menggunakan bentonit. Hasil tar terendah terjadi pada penambahan bentonit 10%. Berkurangnya produksi tar dikarenakan bentonit membantu proses dekomposisi lebih banyak rantai hidrokarbon dalam tar, sehingga lebih banyak tar yang terdekomposisi menjadi *noncondensable* gas.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang sudah dilakukan mengenai pengaruh penambahan katalis bentonit pada proses gasifikasi *updraft* tandan kosong kelapa sawit terhadap hasil *syngas* diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Penambahan bentonit sebanyak 10%, 30%, dan 50% pada proses gasifikasi tandan kosong kelapa sawit mampu mempercepat kenaikan temperatur biomassa.. Hal ini dikarenakan kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 pada bentonit mampu menaikkan konduktivitas termal pada biomassa, sehingga pemanasannya menjadi lebih cepat.
2. Semakin banyak kadar bentonit yang ditambahkan pada tandan kosong kelapa sawit maka volume total *syngas* yang dihasilkan semakin banyak. Hal ini terjadi karena adanya bentonit menyebabkan terjadinya *catalytic cracking* yang membuat biomassa menjadi lebih mudah terurai.
3. Penambahan katalis bentonit mempengaruhi komposisi *syngas* yang dihasilkan. Pada proses gasifikasi menggunakan katalis bentonit, kandungan gas metana yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa menggunakan katalis. Kandungan gas metana tertinggi diperoleh pada variasi penambahan bentonit 10%. Pada penambahan bentonit 30% dan 50%, produksi gas metana cenderung turun dan produksi gas hidrogen meningkat jika dibandingkan dengan penambahan katalis 10%.
4. Penambahan katalis bentonit pada proses gasifikasi tandan kosong kelapa sawit mampu mengurangi produksi tar dibandingkan dengan tanpa menggunakan bentonit. Selain itu dengan semakin bertambahnya kadar bentonit pada proses gasifikasi mampu menurunkan produksi char dan membuat produksi *syngas* semakin tinggi.

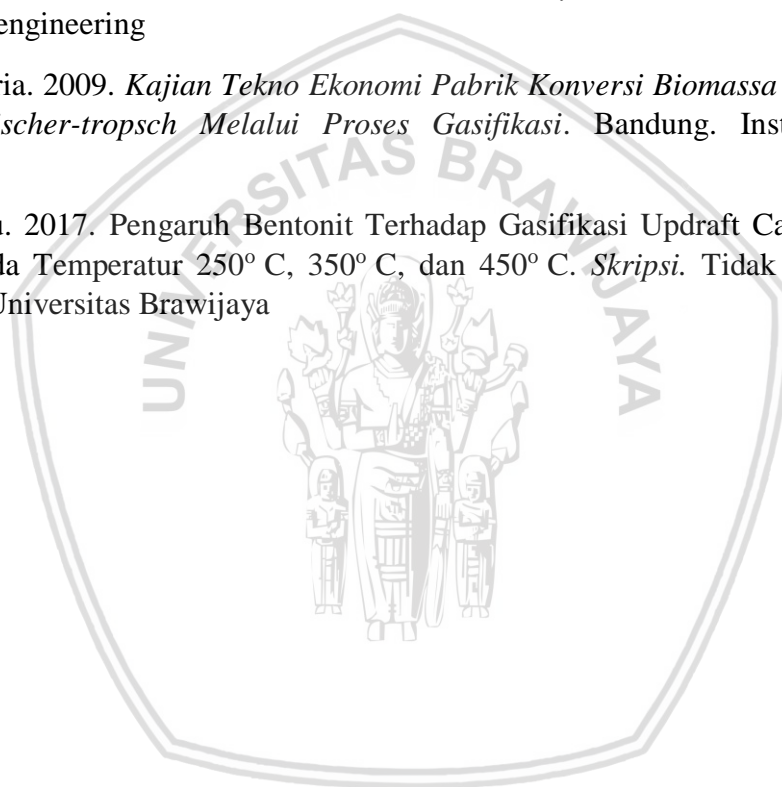
5.2 Saran

1. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh waktu tahan gas di dalam gasifier terhadap hasil *syngas*.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai jumlah udara yang digunakan pada proses gasifikasi tandan kosong kelapa sawit.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin dan Sudrajat . 1997. Prospek Pengusahaan Bentonit di Indonesia. Bandung: PPTM
- Arena, Umberto. 2011. Process and Technological Aspect of Municipal Solid Waste Gasification. A Review. Elsevier: *Waste Management*. 32:625-639
- Basu, Prabir. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. Burlington: Academic Press
- Dewan Energi Nasional. 2014. *Outlook Energi Indonesia 2014*. Jakarta. Kementerian ESDM
- Dou. 2016. *In situ Upgrading of pyrolysis biofuels by bentonite clay with simultaneous production of heterogeneous adsorbent for water treatment*. Elsevier: *Fuel*.195:273-283
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2017. *Statistik Perkebunan di Indonesia 2015-2017*. Sekretariat Direktorat Jendral Perkebunan
- Ditjen PPHP, Departemen Pertanian. 2006. *Pedoman Pengolahan Limbah Industri Kelapa Sawit* Jakarta: Direktorat Pengolahan Hasil pertanian
- Fatimah, Is. 2014. *Adsorpsi dan Katalisis Menggunakan Material Berbasis Clay*. Yogyakarta. Graha Ilmu
- Gates, Bruce C. 1992. *Catalytic Chemistry*. John wiley & sons, inc.
- Huber et al. 2006. *Synthesis of transportation Fuels From Biomass: Chemistry, Catalyst, and Engineering*. Valencia: American Chemical Society
- Ilhamsyah, A.R. 2015. *Karakterisasi Produk Pirolisis Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Biopellet Tandan Kosong Kelapa Sawit*. Bogor: Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor
- Kosivtsov, Yury., Sulman, Esther., Lugovoy, Yury., Kosivtsova, Anna., & Stepacheva, Antonina 2015. Experimental Investigation of the Biomass Catalytic Pyrolysis Process to Produce the Combustible Gases with the High Caloric Value. *Bulletin of Chemical Engineering & Catalysis*. 10 (3):324-331
- Mohammed, M.A.A. et al. 2012. *Gasification of Oil Palm Empty Fruit Bunches: A Characterization and Kinetic Study*. Selangor : University Putra Malaysia
- Quaak, Peter et al. 1999. *Energy From Biomass : A Review of Combustion and Gasification Technologies*. Washington : World Bank Technical Paper
- Raharjo. 2013. Karakteristik Proses Pirolisis Tiga Jenis Limbah Pertanian. *Jurnal Teknik lingkungan UNAND*. 11(2):115-120
- Richardson, James.T. 1989. *Principle of Catalyst Development*. New York: Plenum Press
- Sadeghbeigi, reza. 2012. *Fluid Catalytic Cracking Handbook*. Elsevier

- Shahbaz, Muhammad. et al. 2017. *The influence of catalysts in biomass steam gasification and catalytic potential of coal bottom ash in biomass steam gasification: A review*. Elsevier
- Simell & Leppalahti. 1992. *Catalytic Purification of Tarry Fuel gas with Carbonate Rocks and Ferrous materials*. Espoo: Elsevier
- Sjostrom, Eero. 1993. *Wood Chemistry Fundamentals and Application Second Edition*. Espoo: Academic Press.inc
- Sriram, Nisha. 2005. *Renewable Biomass Energy*. Chicago: Electric Power and Power Electronic Center Illinois institute of Technology
- Yilmaz, M. T., Bayar, S., Elkoca. 2014. *Investigation of adsorption of the dyestuff astrazon red violet 3rn (basic violet 16) on montmorillonite clay*. Sao Paulo. Brazilian journal of chemical engineering
- Yulistiani, Fitria. 2009. *Kajian Tekno Ekonomi Pabrik Konversi Biomassa Menjadi Bahan Bakar Fischer-tropsch Melalui Proses Gasifikasi*. Bandung. Institut Teknologi Bandung
- Zikrilah, Bayu. 2017. Pengaruh Bentonit Terhadap Gasifikasi Updraft Cangkang Kelapa Sawit Pada Temperatur 250° C, 350° C, dan 450° C. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya

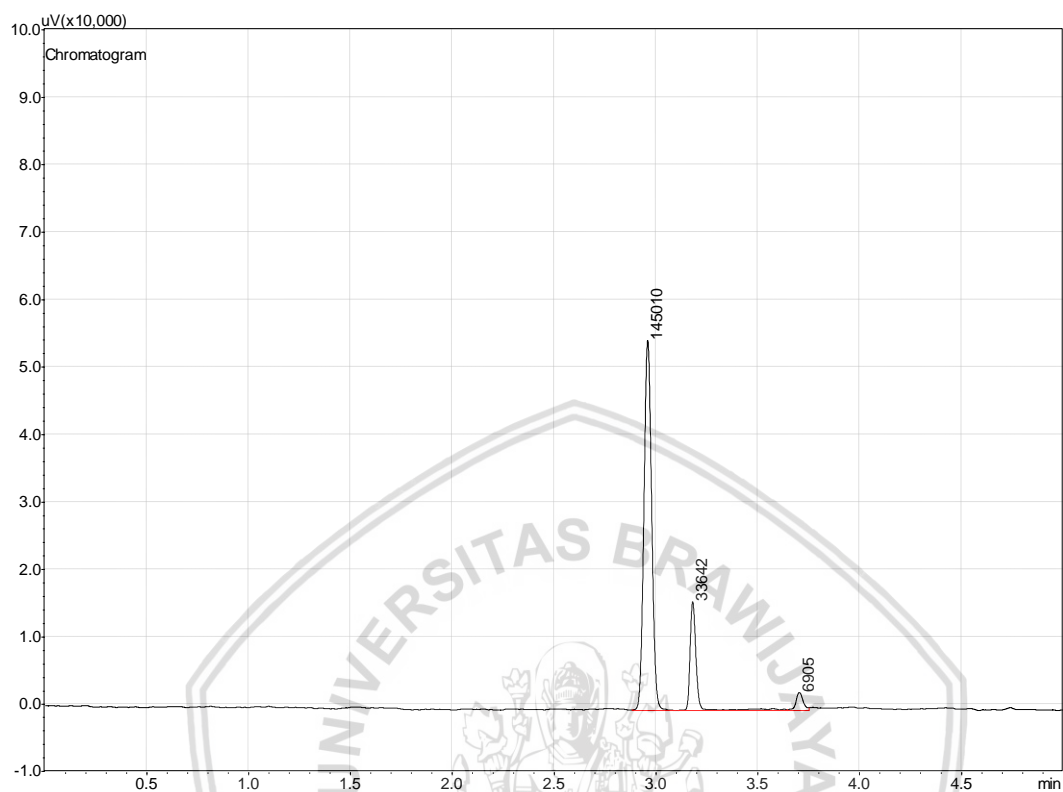


Lampiran 1. Histori Temperatur Biomassa

Waktu (menit)	Bentonit 0%	Bentonit 10%	Bentonit 30%	Bentonit 50%
0	30.87934454	29.2827483	30.24547453	32.45686107
5	34.17378798	32.07104104	38.9094075	39.03518992
10	51.59090626	46.0561023	66.10229766	62.93234857
15	76.27181986	67.40874023	109.6602091	96.20974902
20	111.3754293	103.0121761	167.2511377	92.93415878
25	121.93602	120.4693397	297.3627024	104.8561475
30	168.7791665	303.4210201	312.371465	134.7104015
35	258.3906418	367.6190058	373.8417519	256.667502
40	365.3266309	415.2284088	422.5846861	435.2021032
45	434.0376129	439.6288036	429.7843874	506.4748007
50	427.3642138	401.8564069	406.5305061	470.1047009
55	421.4767864	412.5454051	413.1587726	466.2523005
60	420.4763461	396.1144475	400.720623	458.0263591
65	405.4450579	406.7058018	406.7528588	448.9309181
70	419.2910923	397.2480815	405.2343207	451.7248562
75	406.9292547	404.9493096	408.1337792	441.3347159
80	414.9496061	402.2047657	412.6512645	455.3809518
85	407.4338228	404.7029325	407.1115846	438.818886
90	413.0491654	407.1595795	417.6494919	457.1593906
95	413.1718309	400.9916198	409.1319493	438.0999955
100	415.5795813	413.4253324	421.1605804	460.1398091
105	413.1800555	401.9944253	407.2877821	440.1069399
110	413.8119245	416.1551226	423.9850758	459.0240505
115	421.4202497	401.5286354	407.6161527	444.1441821
120	411.331253	417.8985565	424.7931259	462.3478636

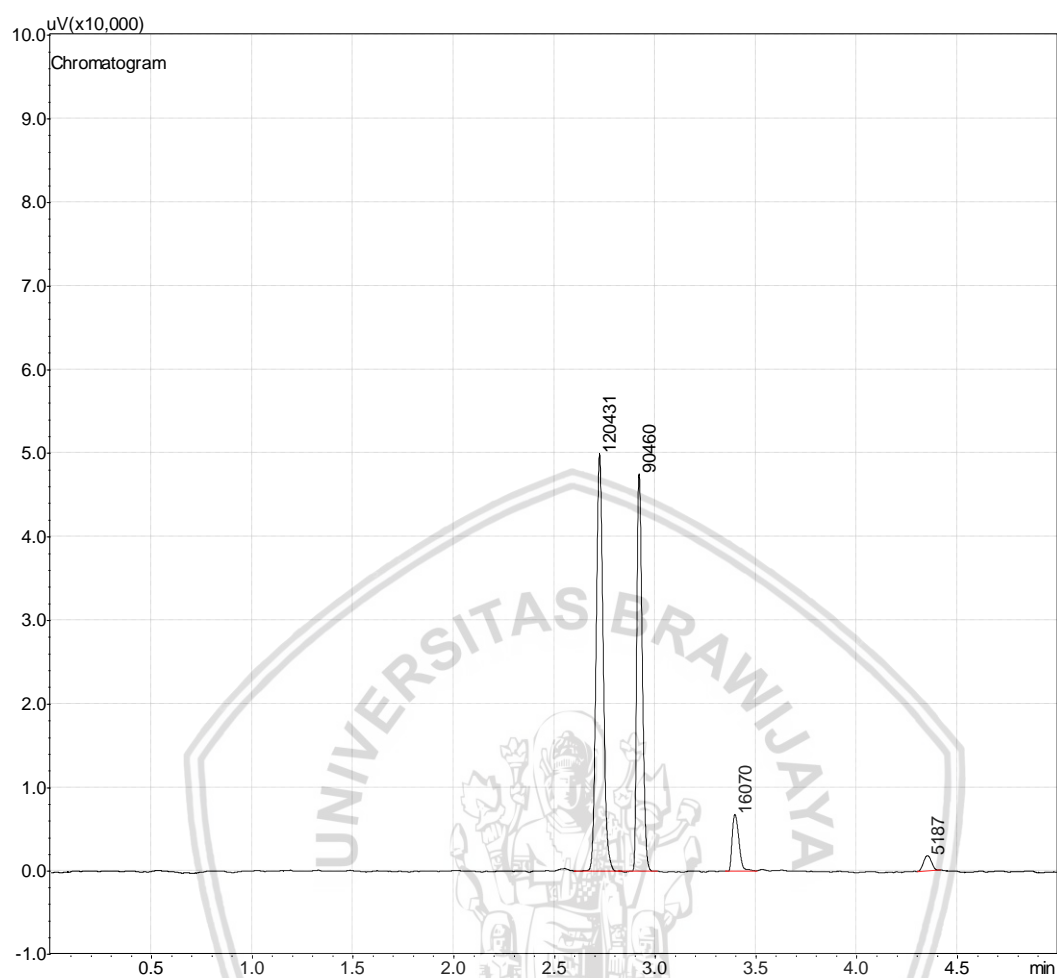
Lampiran 2. Grafik GC (*Gas Chromatograph*)

- Tandan Kosong Kelapa Sawit Tanpa Penambahan Bentonit



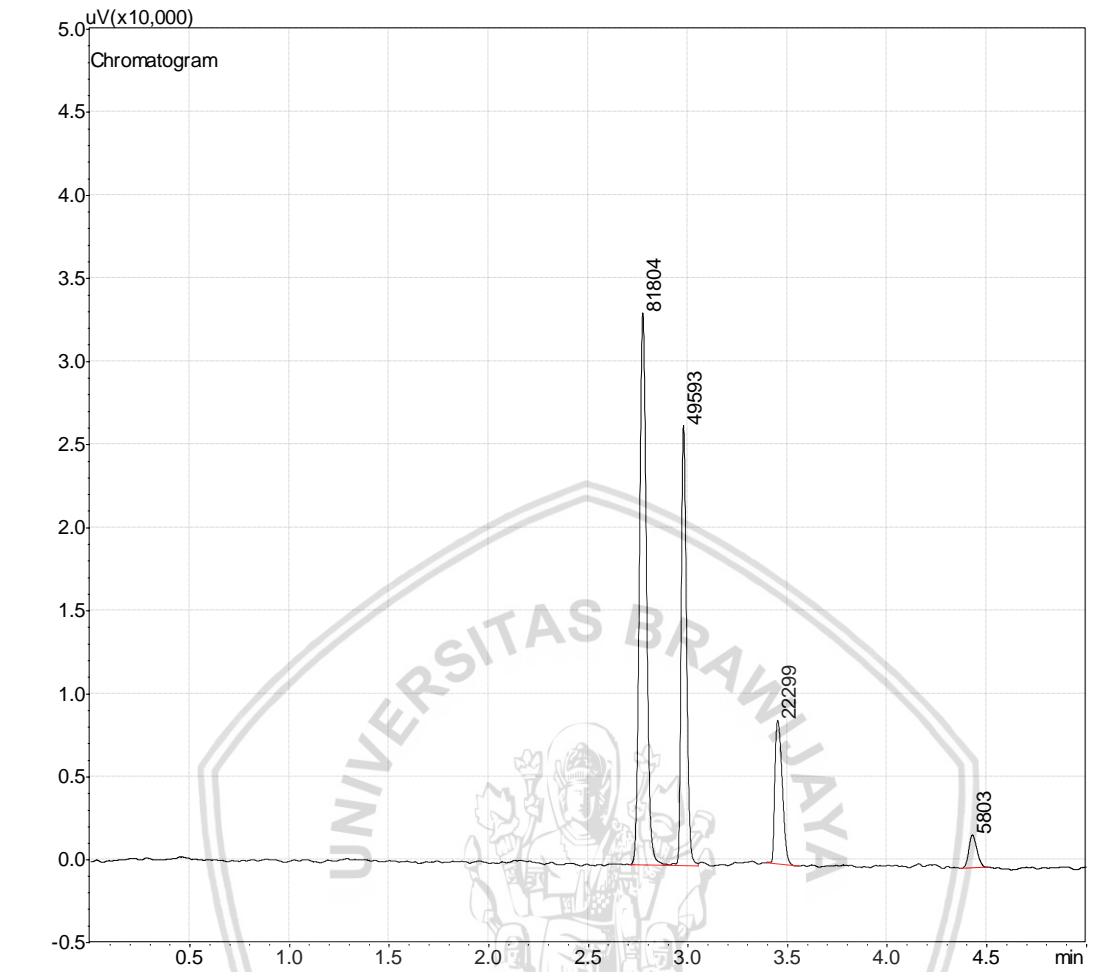
Peak#	Area	Ret. Time	Area%	Height	Conc. %	Name
1	145010.2	2.96	78.1484	54257.5	33.721	Hydrogen
2	33641.8	3.18	18.1302	16089.4	58.704	Methane
3	6905.3	3.704	3.7214	2743	7.575	Carbondioxide

- Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Penambahan Bentonit 10%



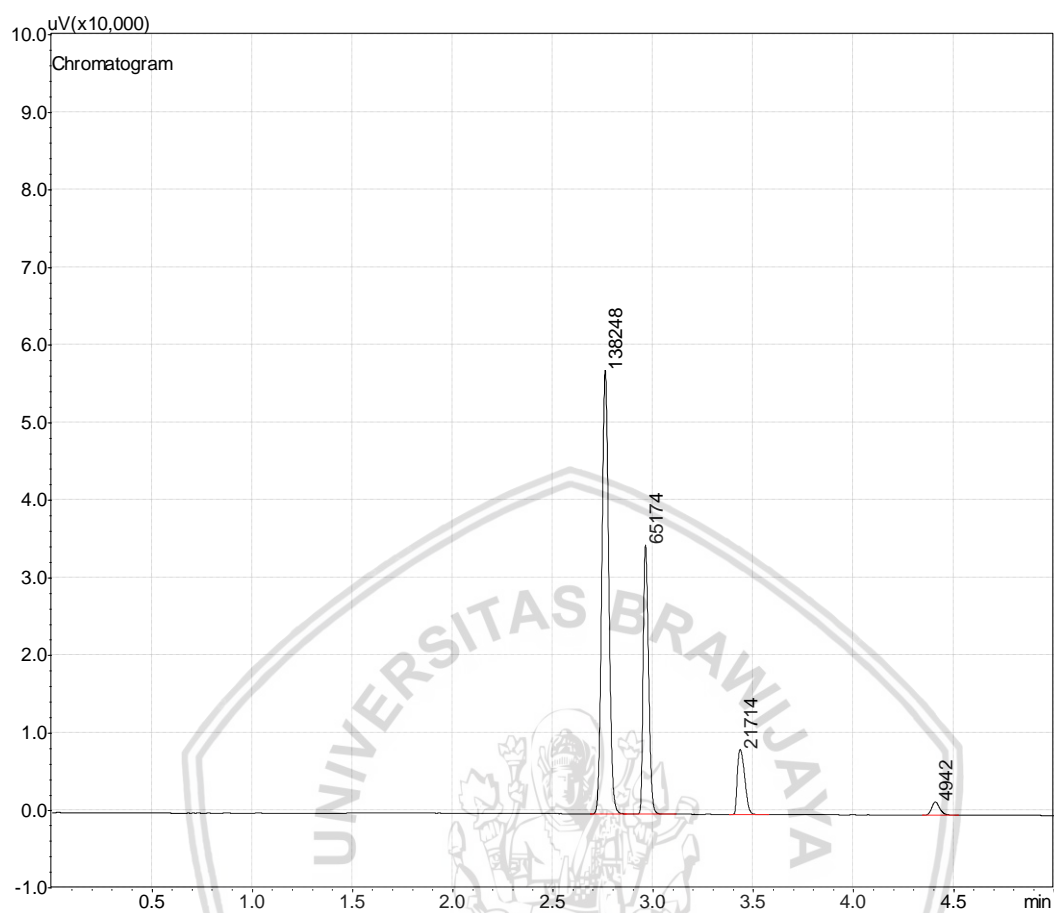
Peak#	Area	Ret. Time	Area%	Height	Conc. %	Name
1	120431	2.723	51.8767	49827.9	16.271	Hydrogen
2	90460	2.92	38.9664	47291.9	77.179	Methane
3	16070.3	3.395	6.9224	6787.5	6.550	Carbondioxide
4	5187.3	4.351	2.2345	1868.3		

- Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Penambahan Bentonit 30%



Peak#	Area	Ret. Time	Area%	Height	Conc. %	Name
1	81803.6	2.773	51.288	32878.3	19.619	Hydrogen
2	49592.6	2.978	31.0929	26164.2	67.936	Methane
3	22299.4	3.451	13.9809	8616.2	12.445	Carbondioxide
4	5802.8	4.428	3.6382	2020.1		

- Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Penambahan Bentonit 50%



Peak#	Area	Ret. Time	Area%	Height	Conc. %	Name
1	138248	2.76	60.0874	56924.3	21.483	Hydrogen
2	65174.2	2.962	28.327	34512.1	68.828	Methane
3	21713.6	3.434	9.4375	8425	9.689	Carbondioxide
4	4942.3	4.408	2.1481	1759.1		

Lampiran 3. Heating value syngas

tps

3

Table 2. Calorific values in MJ/Nm³.

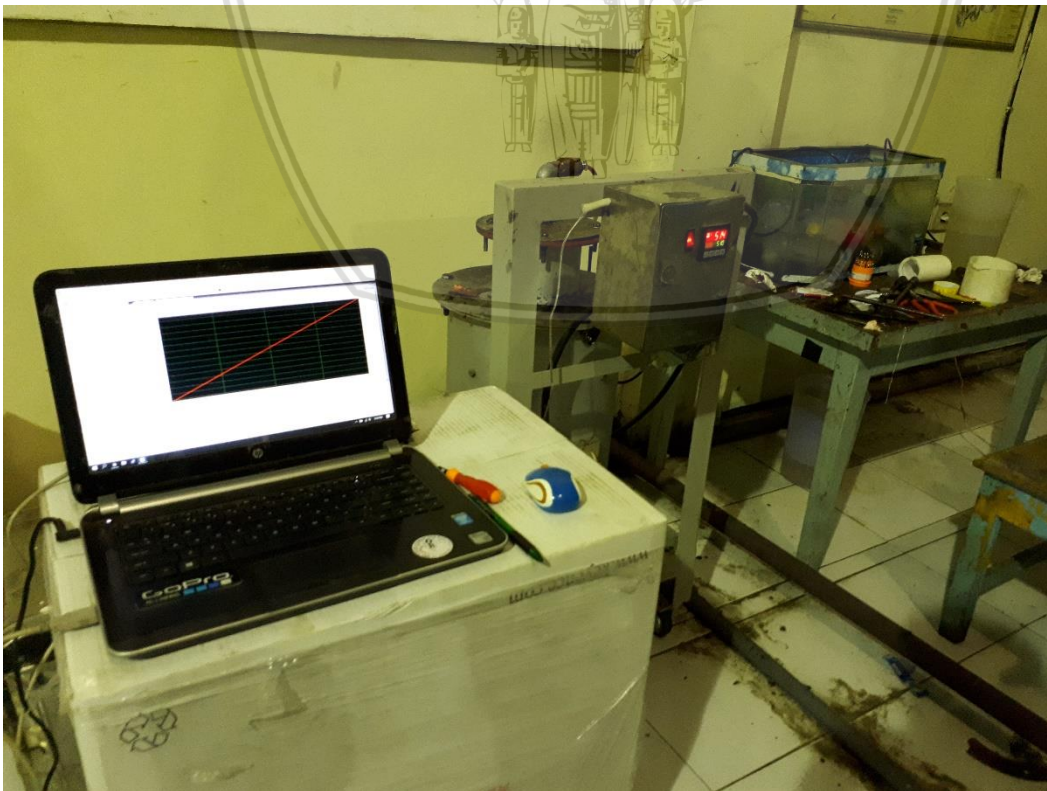
Component	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Company
HHV	12.745	12.633	39.819	70.293	63.414		TU Wien
	12.769	12.622	39.781	69.693	63	58.059	NREL
	12.753	12.626	39.721	69.595	62.952		ECN
	12.766	12.641	39.847	70.402	63.998	58.975	DMT
	12.761	12.634	39.747	69.636	62.989	58.039	Carbona
	12.76	12.617	39.663	69.511	63.042	57.934	Univ. Sherbrook
	12.758	12.631	39.739				Vattenfall
	12.761	12.634	39.75	69.642	62.994	58.022	Nykomb
LHV	10.783	12.633	35.883	64.345	59.457		TU Wien
	10.788	12.622	35.814	63.748	59.036	56.078	NREL
	10.789	12.626	35.796	63.704	59.024		ECN
	10.8	12.6	35.8	63.71		56.03	Verenum
	10.757	12.641	35.787	64.333	59.938	56.924	DMT
	10.748	12.634	35.725	63.605	59.011	56.028	Carbona
	10.793		35.81				Vattenfall
	10.8	12.634	35.823	63.756	59.07	56.06	Nykomb
	10.797	12.635	35.821	63.749	59.068		TPS
	10.789	12.630	35.812	63.744	59.033	56.088	Bioelettrica
Component	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	i-C ₄ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	C ₆ H ₆	Company
HHV	101.242	93.576	125.088	133.119	134.061		TU Wien
	99.091	91.879				142.893	NREL
						147.299	ECN
	101.794	94.343	121.843	131.972	133.981	146.329	DMT
	99.108	91.894		128.502		147.385	Carbona
	98.244					147.143	Univ. Sherbrook
	99.116	91.902	120.696	128.207	128.513	147.398	Nykomb
LHV	93.215	87.575	116.934	122.91	123.81		TU Wien
	91.163	85.934				141.41	NREL
						141.408	ECN
	93.548	88.191	113.806	121.592	123.517	140.301	DMT
	91.066	85.862		118.449		141.352	Carbona
	91.268	86.016	112.848	118.703	118.703	141.512	Nykomb
	91.164	85.925	113.371	117.668	118.569	159.502	Bioelettrica
Component	NH ₃	H ₂ S					Company
HHV	13.072	25.105					ECN
		25.07					Kvaerner
	17.245	25.7					DMT
	17.094	25.123					Carbona
		25.096					Nykomb
LHV	10.128	23.142					ECN
		23.12					Kvaerner
	14.189	23.69					DMT
	14.079	23.134					Carbona
	14.132	23.152					TPS
	14.136	23.113					Bioelettrica

Lampiran 4. Pengambilan data

- *Gasifier*



- Pengambilan data



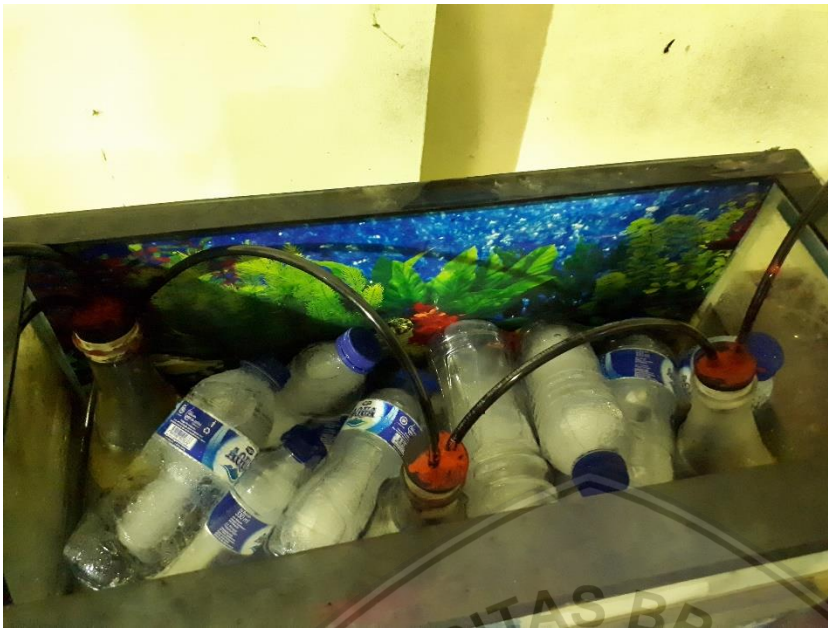
- Tabung ukur volume



- Pengaduk spesimen



- Kondensasi tar



- Hasil char



Lampiran 5. Data volume syngas

0% Bentonit

No	Tinggi (cm)	Waktu (menit)
1	50	7.30
2	50	11.30
3	50	13.10
4	50	14.10
5	50	15.00
6	50	15.40
7	50	16.20
8	50	16.50
9	50	17.20
10	50	17.50
11	50	18.10
12	50	18.40
13	50	19.00
14	50	19.30
15	50	19.50
16	50	20.20
17	50	20.40
18	50	21.10
19	50	21.40
20	50	22.10
21	50	22.30
22	50	23.00
23	50	23.30
24	50	24.00
25	50	24.40
26	50	25.20
27	50	26.00
28	50	27.10
29	50	28.00
30	50	29.00

no	Tinggi (cm)	Waktu (menit)
31	50	30.00
32	50	30.50
33	50	31.40
34	50	32.30
35	50	33.20
36	50	34.00
37	50	34.40
38	50	35.20
39	50	36.00
40	50	36.50
41	50	37.30
42	50	38.20
43	50	39.00
44	50	39.50
45	50	40.30
46	50	41.30
47	50	42.40
48	50	46.20
49	50	1.07.20
50	44	2.00.00
51		
52		
53		
54		
55		
56		
57		
58		
59		
60		

10% Bentonit

No	Tinggi (cm)	Waktu (menit)
1	50	5.45
2	50	7.50
3	50	9.40
4	50	11.35
5	50	12.45
6	50	13.55
7	50	14.55
8	50	15.50
9	50	16.40
10	50	17.40
11	70	18.30
12	50	19.30
13	50	20.20
14	50	21.00
15	60	21.30
16	50	22.10
17	60	22.50
18	60	23.30
19	50	24.00
20	50	24.40
21	50	25.10
22	50	25.50
23	50	26.20
24	50	27.00
25	50	27.30
26	50	28.00
27	50	28.40
28	50	29.20
29	50	30.00
30	50	30.40

no	Tinggi (cm)	Waktu (menit)
31	50	31.20
32	50	31.50
33	50	32.40
34	50	33.20
35	50	34.10
36	50	35.00
37	50	35.50
38	50	36.40
39	50	37.30
40	50	38.20
41	50	39.20
42	50	40.10
43	50	41.10
44	50	42.10
45	50	43.10
46	50	44.30
47	50	46.40
48	50	49.40
49	50	01.06.50
50	48	02.00.00
51		
52		
53		
54		
55		
56		
57		
58		
59		
60		

30% Bentonit

No	Tinggi (cm)	Waktu (menit)
1	50	7.00
2	50	10.50
3	50	12.50
4	50	13.40
5	50	14.40
6	50	15.20
7	50	16.00
8	50	16.40
9	50	17.10
10	50	17.40
11	50	18.10
12	50	18.30
13	50	19.00
14	50	19.30
15	50	19.40
16	50	20.10
17	50	20.30
18	50	20.50
19	50	20.20
20	50	21.40
21	50	22.10
22	50	22.40
23	50	23.10
24	50	23.40
25	50	24.10
26	50	24.40
27	50	25.10
28	50	25.30
29	50	25.50
30	50	26.20

no	Tinggi (cm)	Waktu (menit)
31	50	26.40
32	50	27.00
33	50	28.00
34	50	28.20
35	50	28.50
36	50	29.20
37	50	29.40
38	50	30.10
39	50	30.50
40	50	31.20
41	50	31.50
42	50	32.30
43	50	33.20
44	50	34.10
45	50	34.50
46	50	35.40
47	50	36.40
48	50	37.40
49	50	38.50
50	50	39.50
51	50	41.00
52	50	42.00
53	50	43.20
54	50	45.20
55	50	52.30
56	50	01.17.50
57	53	02.00.00
58		
59		
60		

50% Bentonit

No	Tinggi (cm)	Waktu (menit)
1	50	6.50
2	50	10.50
3	50	13.00
4	50	14.10
5	50	15.00
6	50	15.50
7	50	16.30
8	50	17.00
9	50	17.30
10	50	18.00
11	50	18.30
12	50	18.50
13	50	19.20
14	50	19.50
15	50	20.10
16	50	20.40
17	50	21.10
18	50	21.30
19	50	22.00
20	50	22.30
21	50	23.00
22	50	23.30
23	50	24.00
24	50	24.30
25	50	25.00
26	50	25.30
27	50	26.00
28	50	26.30
29	50	27.00
30	50	27.30

no	Tinggi (cm)	Waktu (menit)
31	50	28.10
32	50	28.40
33	50	29.10
34	50	29.40
35	50	30.10
36	50	30.40
37	50	31.20
38	50	31.50
39	50	32.30
40	50	33.00
41	50	33.40
42	50	34.20
43	50	35.00
44	50	35.40
45	50	36.30
46	50	37.20
47	50	38.10
48	50	39.10
49	50	40.10
50	50	41.10
51	50	42.10
52	50	43.20
53	50	45.00
54	50	48.30
55	50	49.10
56	50	01.04.00
57	50	01.43.10
58	25	02.00.00
59		
60		

- **Lampiran 6. Hasil perhitungan debit**

Bentonit 0%

Waktu (menit)	Debit (liter/jam)
5	6.644
10	12.4575
15	59.796
20	99.66
25	74.745
30	49.83
35	74.745
40	74.745
45	13.59
50	2.372857143
55	2.372857143
60	2.372857143
65	2.372857143
70	0.832632152
75	0.832632152
80	0.832632152
85	0.832632152
90	0.832632152
95	0.832632152
100	0.832632152
105	0.832632152
110	0.832632152
115	0.832632152
120	0.832632152
Rata-rata	20.20262009

Bentonit 10%

Waktu (menit)	Debit (liter/jam)
5	8.666086957
10	25.99826087
15	54.36
20	59.796
25	99.66
30	74.745
35	59.796
40	59.796
45	22.99846154
50	2.902718447
55	6.644
60	6.644
65	6.644
70	0.899784226
75	0.899784226
80	0.899784226
85	0.899784226
90	0.899784226
95	0.899784226
100	0.899784226
105	0.899784226
110	0.899784226
115	0.899784226
120	0.899784226
Rata-rata	20.77283976

Bentonit 30%

Waktu (menit)	Debit (liter/jam)
5	7.118571429
10	12.99913043
15	74.745
20	99.66
25	99.66
30	99.66
35	59.796
40	42.71142857
45	24.915
50	6.953023256
55	2.033877551
60	2.033877551
65	2.033877551
70	2.033877551
75	2.033877551
80	1.307153455
85	1.307153455
90	1.307153455
95	1.307153455
100	1.307153455
105	1.307153455
110	1.307153455
115	1.307153455
120	1.307153455
Rata-rata	22.92299677

Bentonit 50%

Waktu (menit)	Debit (liter/jam)
5	7.292195122
10	12.4575
15	59.796
20	149.49
25	99.66
30	99.66
35	74.745
40	49.83
45	29.898
50	3.359325843
55	3.359325843
60	3.359325843
65	1.272255319
70	1.272255319
75	1.272255319
80	1.272255319
85	1.272255319
90	1.272255319
95	1.272255319
100	1.272255319
105	1.480152475
110	1.480152475
115	1.480152475
120	1.480152475
Rrata-rata	25.37522188

- **Lampiran 7. Perhitungan Volume Total dan Debit**

1. Volume total

-Data yang diperoleh berupa tinggi gas pada tabung ukur. Untuk mencari volume, luas alas tabung dihitung kemudian dikalikan dengan ketinggian gas.

-Menghitung volume gas pada tabung = $\text{Luas alas} \cdot \text{tinggi}$
= $3,14 \cdot r^2 \cdot \text{tinggi}$
= $3,14 \cdot 2,3 \text{ cm} \cdot 2,3 \text{ cm} \cdot 50 \text{ cm}$
= $830,5 \text{ cm}^3$
= $0,8305 \text{ dm}^3 = 0,8305 \text{ liter}$

-Volume tabung ukur dikalikan

Jumlah sampel volume = $0,8305 \text{ liter} \cdot \text{jumlah sampel}$

2. Debit

Debit dihitung dengan rumus volume/waktu. Volume yang terbentuk tiap sampel yaitu 0,8305 liter kemudian dibagi dengan selisih waktu.

